

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

Выпуск 684

2022 г.

Научное рецензируемое издание

Выходит с 1942 года

Издатель:

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

Редакционный совет

Председатель:

Начальник Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского
кандидат техн. наук **А. Н. Нестечук**

Члены редакционного совета:

- С. В. Буг** – доктор пед. наук, проф. (Михайловская военная артиллерийская академия);
В. П. Гаенко – доктор техн. наук, проф., заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации
(12 Центральный научно-исследовательский институт Министерства обороны Российской Федерации);
А. М. Гончаров – доктор воен. наук, проф. (Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»);
М. А. Еремеев – доктор техн. наук, проф. (Московский технологический университет);
А. В. Кузичкин – доктор техн. наук, проф. (Научно-исследовательский институт телевидения);
А. В. Сержантов – доктор воен. наук, проф. (Военная академия Генерального штаба
Вооруженных Сил Российской Федерации);
Б. В. Соколов – доктор техн. наук, проф., заслуженный деятель науки Российской Федерации
(Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук);
К. Г. Ставров – доктор техн. наук, проф. (Государственный научно-исследовательский
навигационно-гидрографический институт)

Главный редактор:

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

Редколлегия:

- председатель **Ю. В. Кулешов**, доктор техн. наук, проф.;
зам. председателя **И. В. Сахно**, доктор техн. наук, проф.;
ответственный секретарь **А. Л. Федер**, доктор воен. наук, доц.;
Н. Ф. Аверкиев, доктор техн. наук, проф.; **В. Ф. Алексеев**, доктор техн. наук, проф.;
Т. В. Алексеев, доктор истор. наук, доц.; **А. П. Алёшкин**, доктор техн. наук, проф.;
В. Н. Арсеньев, доктор техн. наук, проф.; **Д. Н. Бирюков**, доктор техн. наук, доц.;
И. А. Готюр, доктор техн. наук, проф.; **А. П. Доронин**, доктор техн. наук, проф.;
И. Ю. Еремеев, доктор техн. наук, проф.; **В. Н. Калинин**, доктор техн. наук, проф.;
Б. Д. Казахов, доктор воен. наук, проф.; **В. В. Клейменов**, доктор техн. наук, проф.;
В. В. Козлов, доктор техн. наук, проф.; **Н. С. Кужекин**, кандидат филос. наук, проф.;
В. Н. Кузьмин, доктор воен. наук, проф.; **Н. Б. Кунтурова**, доктор пед. наук, доц.;
Е. Л. Лебедев, доктор техн. наук, проф.; **А. Г. Ломако**, доктор техн. наук, проф.;
А. И. Лоскутов, доктор техн. наук, проф.; **Г. Н. Мальцев**, доктор техн. наук, проф.;
Т. О. Мысливцев, доктор техн. наук, доц.; **А. Н. Павлов**, доктор техн. наук, проф.;
А. В. Паршуткин, доктор техн. наук, проф.; **Н. А. Репях**, кандидат филос. наук, доц.;
А. М. Сычева, доктор техн. наук, доц.; **И. В. Фоминов**, доктор техн. наук, доц.;
К. Ю. Цветков, доктор техн. наук, проф.; **А. В. Чарушников**, доктор воен. наук, проф.

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

Ответственный за выпуск:
редактор **А. В. Головина**
Технический редактор
и компьютерная верстка: **Е. Е. Лавриенко**
Техническая поддержка:
К. И. Чувирова

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

Подписано к печ. 19.09.2022.
Формат печатного листа 445×300/4.
Уч.-печ. л. 96,00. Уч.-изд. л. 47,5
Тираж 26 экз. Заказ 4025/84.
Отпечатано в типографии
Военно-космической академии
имени А. Ф. Можайского

СОДЕРЖАНИЕ

СВЯЗЬ, УПРАВЛЕНИЕ, НАВИГАЦИЯ И ВОЕННАЯ РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

- Голяков А. Д., Сасункевич А. А., Фоминов И. В.* Алгоритм оценивания параметров движения центра масс некооперируемого космического аппарата относительно сервисного космического робота на основе обработки бортовой измерительной информации ... 7
- Горбулин В. И., Коваленко А. Ю., Кульвиц А. В., Скопцов А. А.* Методика определения баллистической структуры кластера малых космических аппаратов на круговых орбитах 16
- Евтеев А. В., Мальцев Г. Н.* Определение порядка астатизма следящих измерителей задержки и фазы шумоподобного фазоманипулированного сигнала в системе синхронизации спутниковой радиолинии 26
- Кузьменко Г. А., Пименов В. Ф., Попов А. С.* Оценка влияния коррелированности помех на степень их подавления в адаптивной антенной решетке Хоуэллса – Эпплбаума 38

СБОР И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

- Алексеев В. Ф., Гончаров П. С., Зуева А. Н., Сергеев Д. В.* Методика вычисления значений тензора вторых производных геопотенциала с использованием цифровых моделей гравитационного поля Земли 52
- Алёхин С. Г., Иванов Р. Д., Шемелов В. А.* Метод построения прогностических уравнений для определения высоты нижней границы облачности на основе полуэмпирических зависимостей 62
- Алексеев В. Ф., Астапович А. В., Жбанов К. К., Медяников Д. О.* Метод построения цифровых моделей рельефа по данным оптико-электронной стереосъемки и радиолокационной интерферометрии, с учетом аномальности гравитационного поля Земли 69
- Бирюков Д. Н., Бодунов Г. А., Дудкин А. С., Тельбух В. В.* Подход к определению тематической близости текстов 84

ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

- Андрушкевич Д. В., Бирюков Д. Н., Тимахов П. В.* Подход к снижению количества компьютерных атак на объекты информационной инфраструктуры, основанный на подмене отпечатков операционных систем 94

Бирюков Д. Н., Дудкин А. С., Захаров О. О. Способ тестирования средств защиты информации на основе применения многовариантной генерации исходного кода по заданной функциональной спецификации 113

Лесняк Д. А., Мальцев Г. Н., Матвеев С. А. Методический подход к анализу стойкости симметричных криптографических алгоритмов 123

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

Абдурахимов А. А., Дуга В. В., Полуян М. М. Расчет предельных значений температуры и давления двухфазной среды в гидравлическом контуре системы терморегулирования космического аппарата при его разгерметизации 135

Агишев С. В., Лебедев Е. Л. Метод оценивания влияния достоверности контроля и диагностирования технического состояния бортовой аппаратуры космических аппаратов 142

Антропова А. В., Козлов В. В., Стельмах С. Ф. Модели структур компонентов электромеханических приводов обеспечивающих систем малых космических аппаратов 147

Астапович А. В., Куничкин Д. А., Печников С. Н., Прокофьев А. В. Метод определения метрологических характеристик электронных тахеометров в полевых условиях 158

Беляков А. А., Шулепов А. И. Вариационный метод выбора проектных массогабаритных параметров для высокоорбитального космического аппарата 167

Белянкин А. В., Петухов А. И., Султанов А. Э. Влияние компоновки космической головной части на частоты и формы продольных колебаний корпуса ракеты-носителя 175

Богатов Л. Е., Лебедев Е. Л., Репин А. О. Применение метода акустической эмиссии для контроля сборки подшипниковых узлов силовых гироскопов 182

Болдырев К. Б., Карчин А. Ю. Совершенствование энергомассовых характеристик ракет-носителей со спасаемой первой ступенью путем применения системы перелива ракетного топлива 189

Власов В. А., Горбулин В. И., Радионов Н. В. Определение орбиты космического объекта в центральном гравитационном поле по измерениям трех последовательных направлений на него из подвижной точки наблюдения (задача космической навигации – задача Гаусса) 194

Воронин А. Е., Пешехонов Н. Е., Рыбаков В. В. Концептуальная модель управления надежностью систем электроснабжения важных объектов 201

Горшков Л. К., Лебедев Е. Л., Румянцев К. В. Модель напряженно-деформированного состояния металлооблицовки газоходов стартового комплекса 210

<i>Горянский А. С., Карытко А. А., Карытко Е. С.</i> Методика классификации угловых измерений параметров траекторий движения космических объектов на основе фрагментов функции блеска	218
<i>Калугин Ю. Б., Спильник Ю. А.</i> Методика формирования структуры и состава восстановительного поезда	224
<i>Крупский К. А., Радионов Н. В., Ратушняк А. И.</i> Методика обеспечения сходимости решения уравнения Ламберта в задачах определения орбит космических объектов по двум измерениям	234
<i>Кукушкин И. О., Лизан В. М., Пушкарев А. А.</i> Оценивание степени критичности отказов элементов сложной технической системы космического ракетного комплекса	240
<i>Кукушкин И. О., Софьин А. П., Фёдорова Л. А.</i> Моделирование плоского движения устройства амебоидного типа	247
<i>Лисицкий В. В., Мартынов А. М.</i> Концепция адаптивного ситуационного синтеза структур системы эксплуатации сложных технических систем	256
<i>Миляев И.К., Тарасов А.Г.</i> Подход к анализу эффективности информационного обеспечения автоматизированных систем управления космодрома	265

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

<i>Иноземцева Л. А., Кужекин Н. С.</i> Акмеологические инварианты в структуре профессиональной компетентности преподавателя военно-учебного заведения	274
<i>Канивец Н. В., Крук В. М.</i> Взаимосвязь показателей психологической подготовки личного состава дежурных смен пункта управления связью с психологическими условиями ее совершенствования	279
<i>Костарев С. В., Остроумова Ю. С., Ханин С. Д.</i> Модель подготовки военных специалистов к научно-технологической деятельности	284
<i>Костарев С. В., Остроумова Ю. С., Ханин С. Д.</i> Точки роста в подготовке военно-инженерных кадров к решению задач научно-технологической деятельности	294
<i>Кужекин Н. С., Мышко В. В., Чикуров В. А.</i> Актуальные проблемы функционирования системы контроля успеваемости обучающихся в военном вузе	304
<i>Селихина Н. В., Слюсарев М. Н.</i> Методика оценивания особых условий военной службы по степени опасности для ее использования в процедуре установления ежемесячной надбавки к денежному довольствию военнослужащих	310

ВОЕННО-СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ И КОНСТРУКЦИИ

<i>Авсеенко А. И., Прищепина Д. Н., Сычева А. М., Янчук М. А.</i> Совершенствование процесса технического обслуживания бетонных конструкций специальных сооружений стартовых комплексов	317
<i>Волоткович Д. А., Кучеренко И. В., Мищенко А. В.</i> Оптимизация мачтовых конструкций антенных устройств на основе энергетического критерия	325
<i>Головчинский В. О., Каменев Ю. А., Рябова С. С., Соломахин А. С., Сычева А. М.</i> Определение коэффициента температурного линейного расширения жаростойкого пенобетона для применения в конструкциях газохода стартовых сооружений	334
<i>Пирогов Ю. Н., Попов А. В., Самарина Г. Р., Шарыкин Ф. Е.</i> Концепция модульной структуры мобильных полевых складов горючего	342

ОПЕРАТИВНОЕ ИСКУССТВО И ТАКТИКА

<i>Данелян А.П., Каминский О.Э., Сенченко А.В.</i> Методика обоснования выбора мест размещения запаса космических средств с использованием кластерного анализа	354
Рефераты статей	361
Сведения об авторах	372
Сведения о рецензентах	380

А. Д. Голяков,
доктор технических наук, профессор;
А. А. Сасункевич,
кандидат технических наук;
И. В. Фоминов,
доктор технических наук, доцент

АЛГОРИТМ ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ЦЕНТРА МАСС НЕКООПЕРИРУЕМОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ОТНОСИТЕЛЬНО СЕРВИСНОГО КОСМИЧЕСКОГО РОБОТА НА ОСНОВЕ ОБРАБОТКИ БОРТОВОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Приведены результаты решения задачи оценивания параметров движения центра масс некооперируемого космического аппарата относительно сервисного космического робота по измерениям элементов радиуса-вектора – дальности и его углов ориентации. Представлены результаты численного моделирования, которые позволяют оценить погрешности оценивания элементов вектора параметров движения некооперируемого космического аппарата. При этом учтены принятые допущения о нулевых погрешностях определения параметров движения центра масс сервисного космического робота и о стационарных погрешностях бортовых измерителей в зависимости от начальных значений априорной навигационной информации о параметрах движения некооперируемого космического аппарата и длительности навигационного режима.

Ключевые слова: некооперируемый космический аппарат, сервисный космический робот, бортовые средства измерений, параметры движения, метод наименьших квадратов

ВВЕДЕНИЕ

Околоземное космическое пространство с каждым годом интенсивно пополняется космическим мусором, который образовывается в результате окончания срока активного существования космических аппаратов (КА), аварийных запусков, отказов бортового оборудования КА. Для увода неработоспособного КА с орбиты предлагаются различные способы [1–7]. В ряде случаев существует возможность восстановления работоспособности таких КА путем замены отказавших элементов исправными посредством применения сервисных космических роботов (СКР), способных с помощью бортовых средств оценивать параметры движения центра масс некооперируемого (неработоспособного) КА (НКА) [8–10].

В статье предложен алгоритм решения задачи оценивания параметров движения центра масс НКА с помощью бортовой аппаратуры СКР на основе статистической обработки результатов бортовых измерений. Измеряемыми параметрами являются углы, которые характеризуют ориентацию линии визирования НКА относительно навигационных звезд, и дальность до НКА.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В качестве исходных данных примем следующие модели и параметры.

1. Модель движения СКР и НКА в абсолютной геоцентрической экваториальной системе координат (АГЭСК) $OXYZ$:

$$\mathbf{Q}(t) = \mathbf{F}(\mathbf{Q}(t_0), t), \quad (1)$$

где $\mathbf{Q}(t)$ – вектор параметров движения системы, содержащей СКР и НКА, в момент времени t соответственно, при этом

$$\mathbf{Q}(t) = \left[\mathbf{Q}_1^T(t) \mathbf{Q}_2^T(t) \right]^T$$

Здесь $\mathbf{Q}_i^T(t)$ – вектор параметров движения СКР ($i=1$) и НКА ($i=2$), включающий радиус-вектор $\mathbf{R}_i(t)$ и вектор скорости $\mathbf{V}_i(t)$ в АГЭСК, в момент времени t ; $\mathbf{Q}_i^T(t) = [\mathbf{R}_i(t) \mathbf{V}_i(t)]^T$;

$\mathbf{F}(\bullet)$ – заданная вектор-функция;

t_0 – начальный момент времени.

2. Параметры движения НКА относительно СКР в начальный момент времени в подвижной орбитальной системе координат (ПОСК), начало которой совмещено с центром масс СКР:

$$\mathbf{q}_2(t_0) = [\mathbf{r}_2^T(t_0) \mathbf{v}_2^T(t_0)]^T, \quad (2)$$

где $\mathbf{r}_2(t_0)$ и $\mathbf{v}_2(t_0)$ – радиус-вектор и вектор скорости НКА в момент начала сеанса измерения.

3. Модель измерений, выполняемых бортовыми средствами СКР в момент времени t :

$$\tilde{\boldsymbol{\rho}}(t) = \boldsymbol{\rho}(t) + \Delta\tilde{\boldsymbol{\rho}}, \quad (3)$$

где $\tilde{\boldsymbol{\rho}}(t)$ – вектор результатов измерений, $\tilde{\boldsymbol{\rho}}(t) = [\tilde{\theta}_1(t) \ \tilde{\theta}_2(t) \ \tilde{r}(t)]^T$;

$\tilde{\theta}_\mu(t)$ – результаты измерений углов между линией визирования НКА и направлениями на две звезды с известными координатами, $\mu = 1, 2$;

$\tilde{r}(t)$ – результат измерения дальности до НКА;

$\Delta\tilde{\boldsymbol{\rho}}$ – вектор случайных погрешностей результатов измерений.

Допущения: 1) случайные погрешности результатов бортовых измерений распределены по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и известным среднеквадратическим отклонением (СКО); 2) погрешности определения вектора $\mathbf{Q}_1^T(t)$ равны нулю.

Требуется: оценить текущий вектор параметров движения НКА относительно СКР

$$\hat{\mathbf{q}}_2(t) = [\hat{\mathbf{r}}_2^T(t) \ \hat{\mathbf{v}}_2^T(t)]^T \quad (4)$$

и исследовать его погрешность $\Delta\hat{\mathbf{q}}_2(t)$ в зависимости от продолжительности сеанса измерений и априорных начальных значений вектора $\mathbf{q}_2(t_0)$.

АЛГОРИТМ ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ЦЕНТРА МАСС НКА

Движение СКР и НКА рассмотрим в центральном гравитационном поле Земли. Указанное допущение справедливо при малом (менее 10–20 км) относительном расстоянии между СКР и НКА. Будем полагать следующее: опорное движение СКР и НКА происходит по круговым орбитам с угловыми скоростями $\lambda_j = \sqrt{\mu/r_j^3}$, где μ – гравитационный параметр Земли ($\mu = 3,98602 \cdot 10^5 \text{ км}^3 / \text{с}^2$), r_j – радиус орбиты СКР ($j=1$) и НКА ($j=2$) соответственно.

Плоскость орбиты НКА развернута относительно плоскости орбиты СКР на углы $\Delta i = i_2 - i_1$ и $\Delta\Omega = \Omega_2 - \Omega_1$, где i_j и Ω_j – угол наклона и прямое восхождение восходящего узла орбиты СКР и НКА. Начальное положение НКА в плоскости его орбиты характеризуется углом Δu , который отсчитывается от линии пересечения плоскостей орбит СКР и НКА. Положение плоскостей орбит СКР и НКА в подвижных геоцентрических орбитальных системах координат (ПГОСК) $O_1X_1Y_1Z_1$ и $O_2X_2Y_2Z_2$, а также начальные положения СКР и НКА в момент времени t_0 показаны на рис. 1.

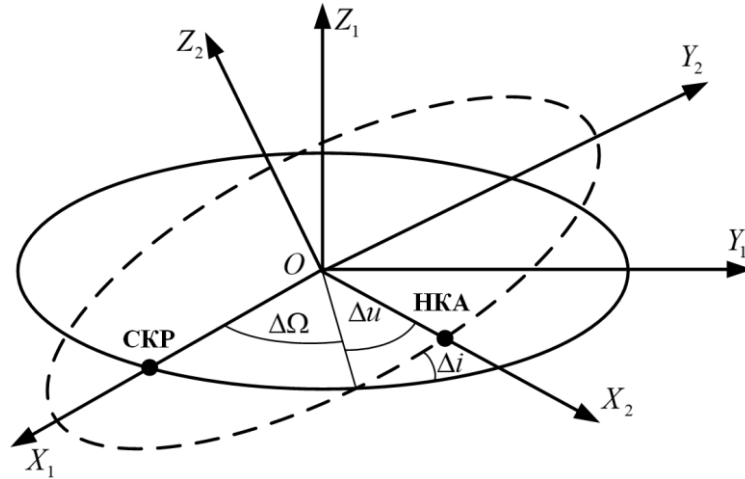


Рис. 1. Положение плоскостей орбит СКР и НКА

Предположим, что параметры движения центра масс СКР известны. Тогда вектор истинных параметров движения центра масс СКР $\mathbf{Q}_1(t)$ совпадает с опорным (известным) $\mathbf{Q}_{1o}(t)$, т. е. $\mathbf{Q}_1(t) = \mathbf{Q}_{1o}(t)$.

Уравнение движения центра масс НКА запишем в виде

$$\mathbf{Q}_2(t) = \mathbf{F}_2(\mathbf{Q}_2(t_0), t). \quad (5)$$

Разложим выражение (5) в ряд Тейлора относительно вектора опорного движения НКА $\mathbf{Q}_{2o}(t)$, который полагаем известным, и ограничимся линейным членом разложения. В результате получим

$$\Delta \mathbf{Q}_2(t) = \mathbf{B}_2(t, t_0) \Delta \mathbf{Q}_2(t_0), \quad (6)$$

где $\Delta \mathbf{Q}_2(t)$ – вектор отклонения истинных параметров движения центра масс НКА относительно опорных в текущий момент времени t : $\Delta \mathbf{Q}_2(t) = \mathbf{Q}_2(t) - \mathbf{Q}_{2o}(t)$;

$\mathbf{Q}_2(t)$ – вектор истинных параметров движения центра масс НКА;

$\mathbf{B}_2(t, t_0)$ – матрица производных текущих параметров движения НКА по его начальным параметрам [11];

$\Delta \mathbf{Q}_2(t_0)$ – вектор отклонения истинных параметров движения центра масс НКА относительно опорных в начальный момент времени t_0 : $\Delta \mathbf{Q}_2(t_0) = \mathbf{Q}_2(t_0) - \mathbf{Q}_{2o}(t_0)$.

Элементы вектора $\mathbf{p}(t)$ связаны с радиусом-вектором НКА $\mathbf{r}(t)$ и ортом \mathbf{e}_η , где $\eta = \overline{1, 2}$, с помощью выражений вида:

$$\theta_\eta(t) = \arccos(\mathbf{e}_\eta \cdot \mathbf{e}(t)); \quad r(t) = \sqrt{x^2(t) + y^2(t) + z^2(t)}, \quad (7)$$

где $\mathbf{e}(t)$ – орт радиуса-вектора НК $\mathbf{e}(t) = \frac{\mathbf{r}(t)}{r(t)}$ А $\mathbf{r}(t)$ в ПОСК СКР $O_1x_1y_1z_1$

(рис. 2);

$\mathbf{r}(t)$ – радиус-вектор НКА в ПОСК СКР $O_1x_1y_1z_1$:

$$\mathbf{r}(t) = \mathbf{M}(\Delta\Omega, \Delta i, \Delta u) \mathbf{R}'_2(t) - \mathbf{R}_1(t);$$

Здесь $\mathbf{M}(\Delta\Omega, \Delta i, \Delta u)$ – матрица перехода от ПГОСК НКА $O_2X_2Y_2Z_2$ к ПГОСК СКР $O_1X_1Y_1Z_1$ [12]:

$$\mathbf{M}(\Delta\Omega, \Delta i, \Delta u) = [m_1 \ m_2 \ m_3],$$

$$\mathbf{m}_1 = \begin{bmatrix} \cos \Delta\Omega \cos \Delta u - \sin \Delta\Omega \sin \Delta u \cos \Delta i \\ \sin \Delta\Omega \cos \Delta u + \cos \Delta\Omega \sin \Delta u \cos \Delta i \\ \sin \Delta u \sin \Delta i \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{m}_2 = \begin{bmatrix} -\cos \Delta\Omega \sin \Delta u - \sin \Delta\Omega \cos \Delta u \cos \Delta i \\ -\sin \Delta\Omega \sin \Delta u + \cos \Delta\Omega \cos \Delta u \cos \Delta i \\ \cos \Delta u \sin \Delta i \end{bmatrix}, \quad \mathbf{m}_3 = \begin{bmatrix} \sin \Delta\Omega \sin \Delta i \\ -\cos \Delta\Omega \sin \Delta i \\ \cos \Delta i \end{bmatrix};$$

$\mathbf{R}'_2(t)$ и $\mathbf{R}_1(t)$ – радиусы-векторы НКА и СКР в ПГОСК $O_2X_2Y_2Z_2$ и $O_1X_1Y_1Z_1$ соответственно;

$x(t), y(t), z(t)$ – координаты НКА в ПОСК СКР $O_1x_1y_1z_1$ в момент времени t :

$$x(t) = x_2(t) - x_1(t), \quad y(t) = y_2(t) - y_1(t), \quad z(t) = z_2(t) - z_1(t).$$

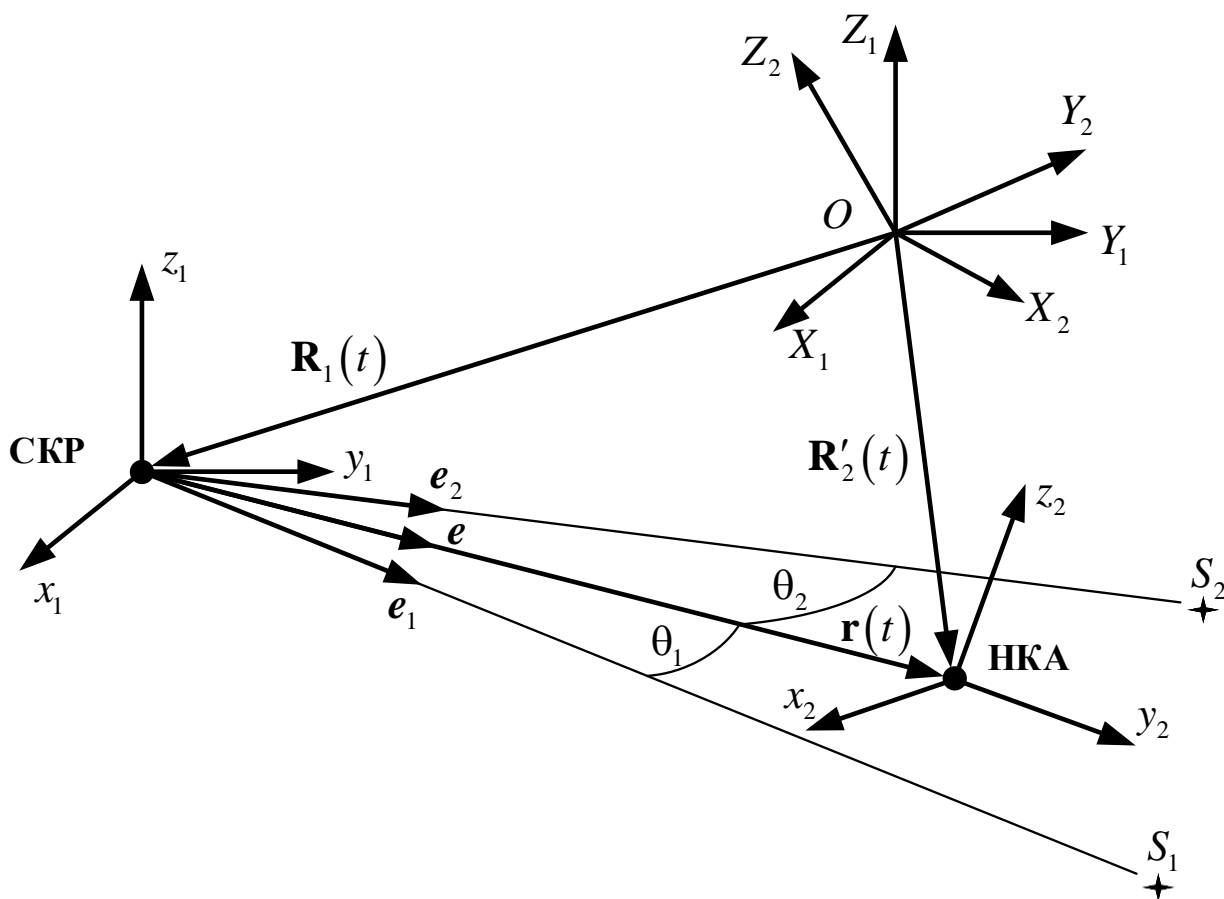


Рис. 2. Элементы вектора измеряемых параметров

Обработка результатов измерений вектора $\tilde{\mathbf{p}}(t_k)$ может быть выполнена одним из известных методов, рассмотренных, например, в монографиях [13–15]. Воспользуемся методом наименьших квадратов. Тогда оценку вектора (2) в начальный момент времени t_0 находим из выражения

$$\hat{\mathbf{q}}_2(t_0) = \left(\mathbf{W}_2^T(t, t_0) \mathbf{K}^{-1} \mathbf{W}_2(t, t_0) \right)^{-1} \mathbf{W}_2^T(t, t_0) \mathbf{K}^{-1} \Delta \tilde{\mathbf{p}}(t), \quad (8)$$

Здесь $\mathbf{W}_2(t, t_0)$ – матрица перехода, $\mathbf{W}_2(t, t_0) = \mathbf{A}_2(t) \mathbf{B}'_2(t, t_0)$, где $\mathbf{A}_2(t)$ – градиентная матрица, элементами которой являются частные производные от измеряемых параметров по составляющим радиуса-вектора НКА в момент времени t :

$$\mathbf{A}_2^T(t) = \begin{bmatrix} \frac{1}{r(t) \sin \theta_1(t)} \left(\frac{x(t)}{r(t)} \cos \theta_1(t) - e_{1x} \right) & \frac{1}{r(t) \sin \theta_2(t)} \left(\frac{x(t)}{r(t)} \cos \theta_2(t) - e_{2x} \right) & \frac{x(t)}{r(t)} \\ \frac{1}{r(t) \sin \theta_1(t)} \left(\frac{y(t)}{r(t)} \cos \theta_1(t) - e_{1y} \right) & \frac{1}{r(t) \sin \theta_2(t)} \left(\frac{y(t)}{r(t)} \cos \theta_2(t) - e_{2y} \right) & \frac{y(t)}{r(t)} \\ \frac{1}{r(t) \sin \theta_1(t)} \left(\frac{z(t)}{r(t)} \cos \theta_1(t) - e_{1z} \right) & \frac{1}{r(t) \sin \theta_2(t)} \left(\frac{z(t)}{r(t)} \cos \theta_2(t) - e_{2z} \right) & \frac{z(t)}{r(t)} \end{bmatrix}$$

(где $e_{\eta x}, e_{\eta y}, e_{\eta z}$ – проекции орта e_η , где $\eta = \overline{1, 2}$ на оси ПГОСК $O_1 X_1 Y_1 Z_1$);

$\mathbf{B}'_2(t, t_0)$ – блок матрицы $\mathbf{B}_2(t, t_0)$ размером 3×6 [13],

$$\mathbf{B}'_2(t, t_0) = \begin{bmatrix} 2 - \cos \varphi_2 & 2 \sin \varphi_2 - 3\varphi_2 & 0 \\ \sin \varphi_2 & 2 \cos \varphi_2 - 1 & 0 \\ \frac{\sin \varphi_2}{\lambda_2} & \frac{2(\cos \varphi_2 - 1)}{\lambda_2} & 0 \\ \frac{2(1 - \cos \varphi_2)}{\lambda_2} & \frac{4 \sin \varphi_2 - 3\varphi_2}{\lambda_2} & 0 \\ 0 & 0 & \cos \varphi_2 \\ 0 & 0 & \frac{\sin \varphi_2}{\lambda_2} \end{bmatrix}$$

(где φ_2 – угол поворота радиуса-вектора НКА, $\varphi_2 = \lambda_2 t$);

\mathbf{K} – весовая матрица, которая определяется выражением

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \sigma_\theta^{-2} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_\theta^{-2} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_\rho^{-2} \end{bmatrix}.$$

Здесь σ_θ и σ_ρ – СКО погрешностей результатов измерений углов $\theta_\eta(t)$ и дальности до НКА r ;

$\Delta \tilde{\mathbf{p}}(t)$ – вектор невязок измерений в момент времени t , $\Delta \tilde{\mathbf{p}}(t) = \tilde{\mathbf{p}}(t) - \mathbf{p}_o(t)$, где $\tilde{\mathbf{p}}(t)$ и $\mathbf{p}_o(t)$ – вектор результатов измерений и вектор опорных измеряемых параметров в момент времени t соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОЧНОСТИ ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ЦЕНТРА МАСС НКА

Оценивание параметров движения НКА по результатам измерений двух углов и дальности до НКА, проводимых бортовыми средствами СКР, выполнено с помощью разработанного алгоритма и с учетом следующих начальных условий:

- опорное движение СКР и НКА происходит по круговым орбитам высотой 600 км, плоскости которых совмещены;
- в момент начала сеанса навигационных измерений опорный радиус-вектор НКА развернут относительно радиуса-вектора СКР на угол 1 град;

– СКО погрешностей результатов измерений углов $\theta_{\eta}(t)$ и дальности до НКА: $\sigma_{\theta} = 0,1'$ и $\sigma_{\rho} = 100$ м.

Погрешность оценивания параметров движения НКА определим вектором

$$\Delta \hat{\mathbf{q}}_2(t_0) = \hat{\mathbf{q}}_2(t_0) - \mathbf{q}_2(t_0), \quad (9)$$

где $\mathbf{q}_2(t_0)$ – вектор априорных значений параметров движения НКА в момент времени t_0 , он определяется выражением

$$\mathbf{q}_2(t_0) = [x(t_0) \ y(t_0) \ v_x(t_0) \ v_y(t_0) \ z(t_0) \ v_z(t_0)]^T.$$

Элементы данного вектора задаются при проведении моделирования.

В табл. 1 приведены выбранные варианты количественных значений вектора $\mathbf{q}_2(t_0)$. Результаты моделирования при условии, что продолжительность сеанса навигационных измерений составляет один виток СКР вокруг Земли, сведены в табл. 2.

Таблица 1

Варианты количественных значений вектора искомых параметров движения НКА

Номер варианта	Элемент вектора искомых параметров движения НКА					
	$x(t_0)$, км	$y(t_0)$, км	$v_x(t_0)$, м/с	$v_y(t_0)$, м/с	$z(t_0)$, км	$v_z(t_0)$, м/с
1	0	0	0	0	0	0
2	1	-1	1	-1	0	0
3	0	0	0	0	1	-1
4	1	-1	1	-1	1	-1
5	5	-5	5	-5	5	-5
6	10	-10	10	-10	10	-10
7	20	-20	20	-20	20	-20

Таблица 2

Результаты моделирования

Номер варианта	Погрешность уточнения параметров движения НКА					
	Δx , м	Δy , м	Δv_x , мм/с	Δv_y , мм/с	Δz , м	Δv_z , мм/с
1	0,05	2,15	-2,43	-0,05	-0,01	-0,04
2	-16,53	-40,18	40,49	13,76	0,01	-0,02
3	-3,62	5,25	0,02	3,07	0,08	-0,04
4	-15,15	-30,57	35,73	12,16	2,75	-4,44
5	49,41	120,22	-179,60	-21,84	59,79	-115,41
6	320,58	2679,37	-1632,59	-310,78	196,70	-486,01
7	2090,98	12364,97	-8315,71	-1925,81	468,12	-2143,86

Анализ полученных результатов показывает, что из выбранных вариантов смещения истинной орбиты НКА относительно его опорной орбиты минимальные погрешности уточнения параметров движения НКА наблюдаются в первом варианте, который соответствует движению НКА по опорной орбите. При этом погрешности оценок по радиальной и боковой координатам составляют 0,01–0,05 м, а погрешности по трансверсальной и боковой составляющим скорости 0,04–0,05 мм/с. Погрешности оценок по трансверсальной координате и радиальной составляющей скорости НКА принимают значения, которые достигают 2,15 м и 2,43 мм/с соответственно.

Погрешности уточнения параметров движения НКА принимают наибольшие значения при моделировании шестого и седьмого вариантов, в которых элементы вектора $\mathbf{q}_2(t_0)$ в соответствии с табл. 1 равны 10–20 км по координатам и 10–20 м/с по составляющим вектора скорости. Одним из способов парирования этого эффекта является использование высоко-

точного измерителя дальности. Исследования показали, что если в состав бортовой аппаратуры НКА входит дальномер, СКО погрешности измерений которого равно 1 м, погрешности уточнения координат НКА не превышают 2–4 км, а погрешности уточнения составляющих скорости НКА – 2–5 м/с.

Исследуем зависимость вектора погрешности (8) от продолжительности сеанса навигационных измерений. На рис. 3 и 4 представлены графики зависимости погрешности уточнения координат и составляющих вектора скорости НКА от продолжительности сеанса навигационных измерений. Вектор искомых параметров движения НКА соответствует четвертому варианту.

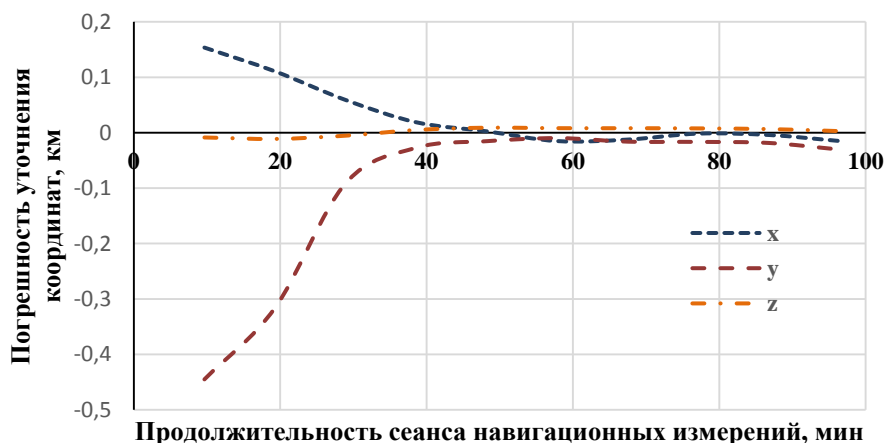


Рис. 3. Графики зависимостей погрешности уточнения координат НКА от продолжительности сеанса навигационных измерений

Представленные на рис. 3 и 4 графики свидетельствуют о том, что с ростом продолжительности сеанса навигационных измерений погрешности уточнения параметров движения центра масс, характеризующих движение НКА в плоскости его орбиты, уменьшаются. Погрешности уточнения параметров, характеризующих движение НКА относительно плоскости его орбиты, при варьировании продолжительности сеанса навигационных измерений в пределах одного витка СКР вокруг Земли сохраняют свои значения в диапазонах от 2,8 до 11,2 м по боковой координате и от 3,5 до 13,2 мм/с по боковой составляющей скорости.

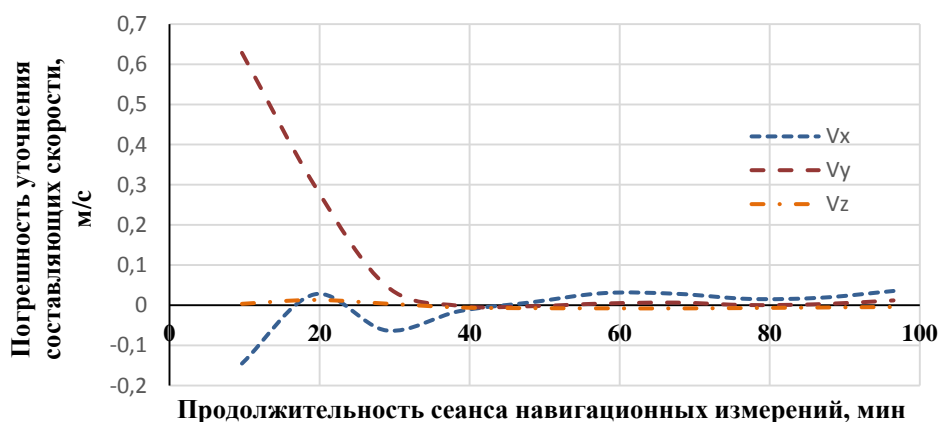


Рис. 4. Графики зависимостей погрешности уточнения составляющих вектора скорости НКА от продолжительности сеанса навигационных измерений

Приведенные результаты исследований получены при условии, что СКР и НКА движутся по орбитам высотой 600 км. Вариации высоты орбиты СКР ведут к изменению погрешно-

стей уточнения координат и составляющих вектора скорости НКА. На рис. 5 изображены графики зависимостей погрешности уточнения координат и составляющих вектора скорости НКА от высоты орбиты СКР.

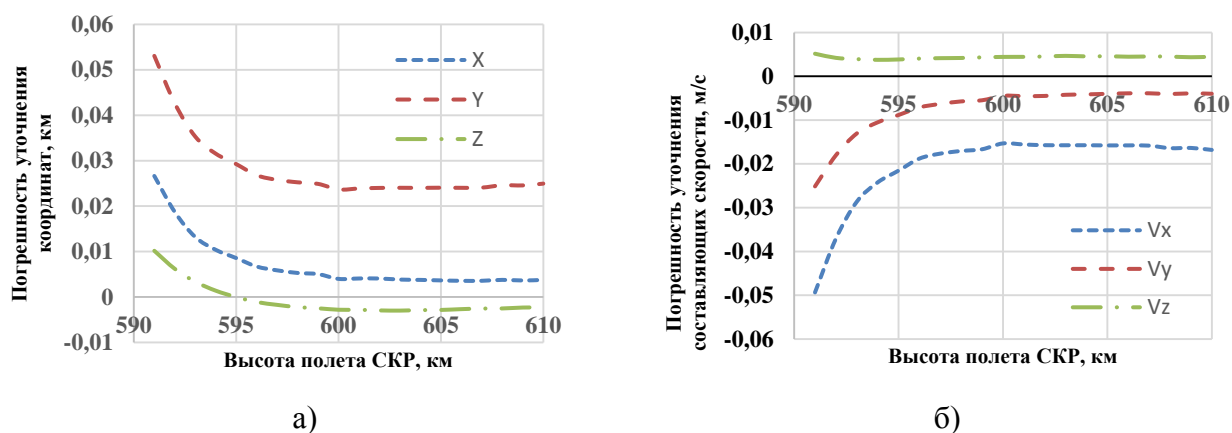


Рис. 5. Графики зависимостей погрешности уточнения координат НКА (а) и вектора скорости НКА (б) от высоты орбиты СКР

Полученные результаты показывают, что с ростом высоты орбиты СКР от 590 до 600 км погрешности уточнения координат и составляющих вектора скорости НКА уменьшаются. В диапазоне высот от 600 до 610 км погрешности уточнения координат и составляющих вектора скорости НКА не изменяются.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты оценивания параметров относительного движения СКР по измерениям относительной дальности и двух углов, выполненные с помощью разработанного алгоритма, показали, что при выбранных исходных данных и отклонениях истинного движения от опорного на ± 5 км по координатам и ± 5 м/с по составляющим вектора скорости погрешности оценок параметров движения НКА не превышают 120 м по координатам и 180 мм/с по составляющим скорости. Предельно достижимая точность решения задачи уточнения вектора параметров движения НКА характеризуется погрешностями оценок: $0,01 \div 2,15$ м по координатам и $0,04 \div 2,43$ мм/с по составляющим скорости.

Точность решения задачи определения параметров движения НКА не зависит от продолжительности сеанса навигационных измерений при условии, что навигационные измерения проводятся в течение интервала времени, превышающего половину витка СКР вокруг Земли. При уменьшении продолжительности сеанса навигационных измерений погрешности определения параметров, характеризующих движение НКА в плоскости его орбиты, увеличиваются.

Снижение высоты полета СКР приводит к росту погрешностей уточнения координат и составляющих вектора скорости НКА. Наибольшую чувствительность к изменению высоты полета СКР проявляют координаты и составляющие скорости НКА, характеризующие движение в плоскости его орбиты.

Повышение точности навигации НКА может быть достигнуто путем роста частоты измерений углов и дальности до НКА. Представленные исследования могут быть использованы при обосновании облика бортовых систем СКР.

Список используемых источников

1. *Палий А. С.* Методы и средства увода космических аппаратов с рабочих орбит // *Техническая механика*. – 2012. – № 1. – С. 94–102.
2. *Трушляков В. И., Юткин Е. А.* Обзор существующих разработок средств спуска крупногабаритного космического мусора как операции обслуживания аппаратов на орбите // *Омский научный вестник*. – 2015. – № 3. – С. 50–56.
3. *Пикалов Р. С., Юдинцев В. В.* Обзор и выбор средств увода крупногабаритного космического мусора // *Труды МАИ*. – 2018. – № 100. – С. 1–37.
4. *Асланов В. С., Юдинцев В. В.* Выбор параметров системы увода космического мусора с упругими элементами посредством тросовой буксировки // *Труды МАИ*. – 2018. – № 1. – С. 7–17.
5. *Клюшников В. Ю.* Как очистить околоземное пространство от космического мусора? // *Воздушно-космическая сфера*. – 2019. – № 1(98). – С. 96–107.
6. *Рязанов В. В., Ледков А. С.* Увод наноспутника с низкой орбиты с помощью ионного потока // *Известия Саратовского университета*. – 2019. – Т. 19, вып. 1. – С. 82–93.
7. *Минаков Е. П., Власов Р. П.* Алгоритм обработки траекторной информации уточнения параметров движения объектов по одновременным двукратным измерениям двумя космическими аппаратами роторного типа // *Известия ТулГУ*. – 2019. – Вып. 3. – С. 184–191.
8. *Силантьев С. И., Фоминов В. И., Королев С. Ю.* Роботы на орбите // *Воздушно-космическая сфера*. – 2016. – № 2 (87). – С. 118–123.
9. *Градовцев А. А., Кондратьев А. С., Лопота А. В.* Средства робототехнического обеспечения функций перспективной космической инфраструктуры // *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. – 2013. – № 1. – С. 111–118.
10. *Белоножко П. П.* Космическая робототехника для монтажа и сервиса: потенциальные задачи, концепции перспективных систем // *Воздушно-космическая сфера*. – 2019. – № 2(99). – С. 85–95.
11. *Эльясберг П. Е.* Определение движения по результатам измерения. – М., 1976. – 416 с.
12. *Основы теории полета космических аппаратов / под ред. Г. С. Нариманова и М. К. Тихонравова*. – М.: Машиностроение, 1972. – 608 с.
13. *Порфирьев Л. Ф., Смирнов В. В., Кузнецов В. И.* Аналитические оценки точности автономных методов определения орбит. – М.: Машиностроение, 1987. – 279 с.
14. *Автономная навигация космических аппаратов / Г. П. Аншаков [и др.]*. – Самара: ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс», 2011. – 486 с.
15. *Голяков А. Д., Ананенко В. М., Фоминов В. И.* Системы навигации космических аппаратов. – СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2017. – 269 с.

В. И. Горбулин,
доктор технических наук, профессор;
А. Ю. Коваленко,
кандидат технических наук;
А. В. Кульвиц,
кандидат технических наук, доцент;
А. А. Скопцов

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ КЛАСТЕРА МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА КРУГОВЫХ ОРБИТАХ

Исследуется орбитальное построение кластера из трех спутников, расположенных на круговых орбитах равной высоты и одинакового наклона и выполняющих общую целевую задачу совместного мониторинга заданных районов поверхности Земли (например, пространственную стереосъемку). Условие одновременности функционирования целевой аппаратуры спутников обуславливает следующее требование к параметрам баллистической структуры кластера: при решении целевых задач спутники находятся на сравнительно небольшом расстоянии друг от друга. Разработана методика определения баллистической структуры малых космических аппаратов на круговых орбитах. Использование понятия псевдоэкватора и его свойств позволило получить аналитические соотношения и существенно уменьшить как размерность рассматриваемой оптимизационной задачи, так и временной интервал поиска ее решения.

Ключевые слова: малый космический аппарат, баллистическая структура, кластер, псевдоэкватор.

ВВЕДЕНИЕ

Настоящее время характеризуется активными научными и практическими разработками систем космических аппаратов (КА) на основе малых КА (МКА). Среди основных тенденций развития таких систем можно выделить проектирование космических систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), связи, а также разработку нового типа космического объекта – так называемого кластера (в англоязычной терминологии – «роя») МКА, функционирующего как единый космический объект [1, 2]. Вопросы целевого применения совместно функционирующих групп МКА достаточно подробно рассмотрены в специальной литературе и являются постоянным объектом интереса на конференциях различного уровня, посвященным тематике по МКА [1, 3]. Среди возможных областей применения выделяют следующие:

- оперативный мониторинг дистанционного зондирования Земли;
- комплексный мониторинг путем совместного использования различной целевой аппаратуры;
- оперативный радио- и радиотехнический мониторинг;
- мобильную связь;
- создание низкоорбитального сегмента космической навигационной системы.

Космические системы, сформированные из кластеров МКА, обладают новыми качественными возможностями, обусловленными системными свойствами кластеров. Например, для космических систем ДЗЗ, как показано в ряде работ [4, 5], возможна реализация следующих системных эффектов:

1. Многопозиционность, многодиапазонность и одновременность наблюдения объекта с нескольких МКА, обеспечение эффекта стереосъемки.
2. Возможность комплексирования информации, получаемой от разнородных бортовых комплексов специальной аппаратуры МКА, приводящая к повышению информативности наблюдения.

3. Обеспечение непрерывности наблюдения за счет возможности «передачи эстафеты» наблюдения последовательно входящим в зону видимости объекта другим МКА орбитальной группировки [1, 6].

В качестве одного из перспективных направлений в области ДЗЗ можно рассматривать применение КА, оснащенных радиолокационными комплексами [4, 8]. Важным этапом развития систем ДЗЗ в радиолокационном диапазоне является использование кластеров МКА [9–11]. Так, при наличии двух-трех МКА в составе кластера возможно измерение разности фаз изображений одной целевой области, полученных с различных позиций на орбите с относительной временной задержкой [9]. Применение кластеров в составе системы МКА позволяет проектировать системы МКА обзора всей поверхности Земли с заданным временным разрывом в наблюдении и с высокой точностью. Кроме того, системы МКА, построенные с использованием кластеров, открывают большие возможности для применения интерферометрической съемки поверхности Земли и позволяют осуществить:

- формирование цифрового рельефа местности;
- мониторинг смещений земной поверхности;
- мониторинг изменения уровня ледников.

Для интерферометрической съемки с заданной периодичностью в наблюдении необходимо использовать систему КА, состоящую из нескольких кластеров МКА, но при этом ширина полосы обзора кластера (совместная полоса двух-трех МКА, образующих кластер) должна быть не менее межвиткового расстояния [3]. При построении систем МКА большое значение имеет наклонение орбит МКА, которое не может выбираться произвольно. Вместе с тем при построении систем МКА обзора поверхности Земли с разрывом в наблюдении особый случай представляет собой вариант построения с шириной полосы обзора, равной межвитковому расстоянию. В этом случае существует возможность выбора наклонения в достаточно широком диапазоне.

Как правило, функционирование бортовой аппаратуры определяет жесткие требования к относительному положению МКА в составе кластера МКА во время орбитального полета. Следовательно, при проектировании космических систем МКА возникают дополнительные ограничения, которые существенно усложняют обоснование баллистической структуры орбитальной группировки МКА, состоящей из кластеров МКА, которые, в свою очередь, имеют собственную баллистическую структуру. Поэтому этапы баллистического проектирования таких систем МКА будут существенно отличаться от проектирования традиционных систем КА (МКА), не состоящих из кластеров МКА [12, 13]. Так, для обеспечения требуемого целевого эффекта, т. е. для реализации методов стереосъемки или многопозиционного зондирования, необходимо, чтобы МКА в составе кластера функционировали на заданном расстоянии друг относительно друга и были структурно устойчивыми. Считается, что структурно устойчивыми являются системы на круговых орбитах с одинаковыми высотой и наклонением [7]. Поэтому в случае, когда кластер МКА состоит из трех и более МКА, возникает задача выбора баллистической структуры данного кластера на круговых равно наклонных орбитах, которая позволила бы обеспечить заданные требования. При этом обоснование вариантов орбитального построения кластера из n МКА возможно осуществлять как по критерию оптимальности, так и по критерию сатисфакции (пригодности). В последнем случае соответствующая задача предполагает поиск множества решений, т. е. формирование области $\Delta_{\text{Одоп}}$ допустимых значений параметров баллистических структур таких, чтобы в любой момент времени $t \in T_{\text{исслед}}$ на исследуемом интервале $T_{\text{исслед}}$ расстояние d_{jk} между j -м и k -м МКА кластера, $j \neq k$, было бы больше минимального $d_{\text{мин}}$ и меньше максимального $d_{\text{макс}}$ значений $d_{jk}(t) \in (d_{\text{мин}}, d_{\text{макс}}) \forall t \in T_{\text{исслед}}$:

$$\Delta_{\text{Одоп}} = \left\{ O_{\langle 2, n-2 \rangle} \right\}^d = \left\{ O_{\langle 2, n-2 \rangle} \mid d_{jk}(t; O_{\langle 2, n-2 \rangle}) \in (d_{\text{мин}}, d_{\text{макс}}) \forall t \in T_{\text{исслед}} \right\}, \quad j = 2, \dots, n, \quad k = 2, \dots, n, \quad j \neq k.$$

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим случай движения трех МКА ($n = 3$) по круговым орбитам радиусом r с одинаковым наклоном i . Необходимо определить баллистическую структуру кластера МКА, состоящего из трех МКА, т. е. необходимо определить множество следующего вида:

$$\Delta_{O_{\text{доп}}} = \left\{ O_{\langle 2, n-2 \rangle} \right\}^d = \left\{ (\Omega_2, u_{20}, \Omega_3, u_{30}) \mid d_{jk}(t; O_{\langle 2, n-2 \rangle}) \in (d_{\min}, d_{\max}) \forall t \in T_{\text{исслед}} \right\}, \quad (1)$$

где Ω_2, Ω_3 – прямое восхождение восходящего узла второго и третьего МКА;

u_{20}, u_{30} – аргумент широты второго и третьего МКА в начальный момент времени t_0 (считается, что эти параметры для первого спутника являются нулевыми: $\Omega_1 \equiv 0, u_{10} \equiv 0$).

Причем данное множество должно быть такое, чтобы было обеспечено следующее требование функционирования бортовой аппаратуры:

$$d_{\min} < d_{jk}(t) < d_{\max}, \quad (2)$$

где d_{\min}, d_{\max} – минимальное и максимальное расстояния между МКА соответственно.

МЕТОДИКА И ОСОБЕННОСТИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

При синтезе спутниковых систем, в отличие от рассматриваемой задачи, как правило, никаких ограничений на параметры Ω_k, u_{k0} ($k = 2, \dots, n$) не накладывается. Принципиальное отличие рассматриваемой задачи от известных состоит именно в исследовании влияния ограничения (2) на параметры допустимого множества альтернатив (1).

Рассмотрим этапы методики определения баллистической структуры (МКА) на круговых орбитах, основанной на свойствах псевдоэкватора, который успешно используется при решении подобного класса задач [14–16].

Этап 1. Рассмотрим вначале случай движения двух МКА по круговым орбитам с одинаковым наклоном i в разных орбитальных плоскостях. Обозначим текущее положение МКА-1, 2 на орбите через радиус-вектор r , а угол между радиусами-векторами, определяющими текущее положение МКА на орбите, – через l (рис. 1). Для любых двух МКА, расположенных на круговых орбитах с одинаковым радиусом, на сфере единичного радиуса существует большой круг. Этот круг обладает таким свойством, что в некоторый момент времени оба МКА оказываются в плоскости \mathcal{E}^* , которая содержит указанный большой круг, причем плоскости орбит обоих спутников по отношению к плоскости \mathcal{E}^* наклонены под одинаковым углом $i_1^* = i_2^* = i^*$. Вследствие этого в любой момент времени рассматриваемые спутники находятся на одинаковом расстоянии от плоскости псевдоэкватора \mathcal{E}^* , а отрезок, их соединяющий (линия визирования), совершает вращательное движение вокруг нормали к псевдоэкватору. В системе координат, связанной с псевдоэкватором, соотношения для расчета параметров относительного движения двух КА приобретают простейший (канонический) вид. В частности, угловая дальность l между двумя КА определяется выражением

$$l = 2 \cdot \arcsin \left(\sin \left(\frac{\Delta \Omega^*}{2} \right) \cdot \sqrt{1 - \sin^2 i^* \cdot \sin^2 u^*} \right),$$

а углы Эйлера $\Psi_{\text{л.в.}}, \Theta_{\text{л.в.}}, \Phi_{\text{л.в.}}$, задающие ориентацию линии визирования спутников в инерциальном пространстве, изменяются с течением времени t по следующему закону:

$$\Psi_{\text{л.в.}} = 0 = \text{const}, \quad \Theta_{\text{л.в.}} = i^* = \text{const}, \quad \Phi_{\text{л.в.}} = \Phi_{0 \text{ л.в.}} + \Lambda, \quad \Phi_{0 \text{ л.в.}} = \frac{\pi +}{2}, \quad \text{tg } \Lambda = \text{tg } u^* \cdot \cos i^*.$$

Здесь u^* – аргумент широты КА, отсчитываемый от псевдоэкватора,

$$u^* = \frac{2 \cdot \pi}{T_{\text{КА}}} \cdot (t - t_0^*),$$

где t_0^* – момент времени прохождения спутниками псевдоэкватора;

$T_{\text{КА}}$ – период обращения КА по орбите;

$\Delta\Omega^* = \Omega_2^* - \Omega_1^*$ – разница между прямыми восхождениями восходящих узлов относительно псевдоэкватора.

Этап 2. Расстояние между МКА имеет максимальное значение, когда они находятся на псевдоэкваторе и минимальное – через четверть периода. Изменение этого расстояния носит также колебательный характер. При этом линия визирования осуществляет вращательное вращение вокруг оси, перпендикулярной плоскости псевдоэкватора.

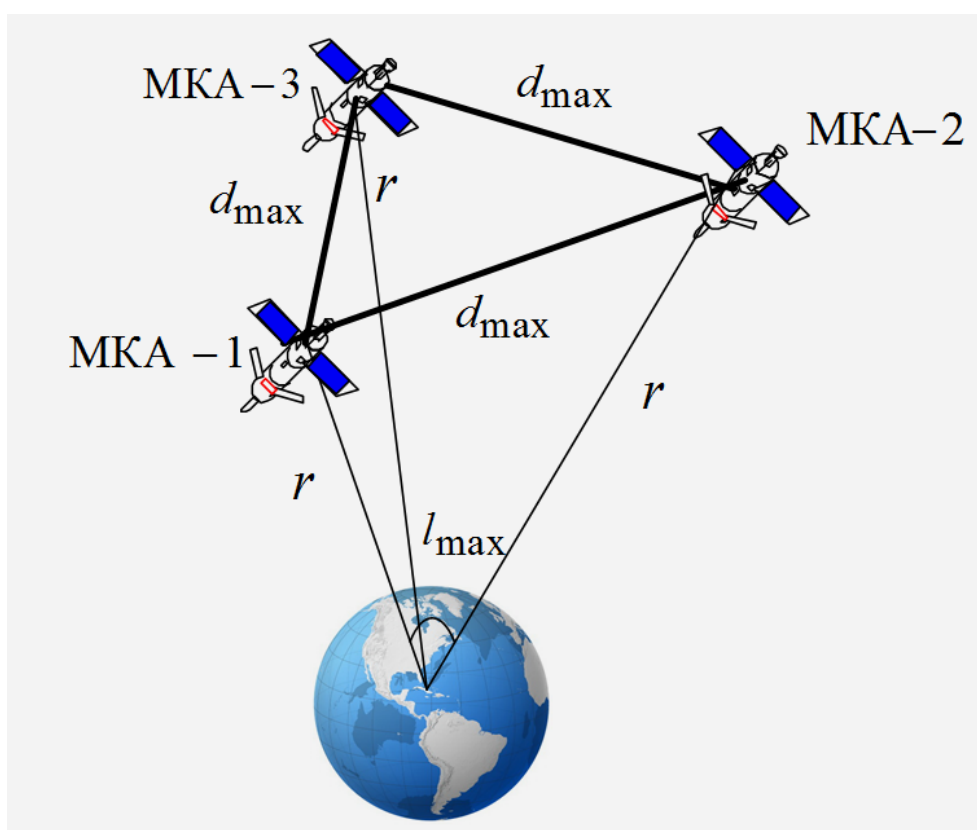


Рис. 1. К определению l_{\max}, l_{\min}

Тогда, по теореме косинусов, найдем значения угла l , которое соответствует максимальному и минимальному расстояниям между МКА в составе кластера:

$$l_{\max} = \arccos\left(\frac{2r^2 - d_{\max}^2}{2r^2}\right),$$

$$l_{\min} = \arccos\left(\frac{2r^2 - d_{\min}^2}{2r^2}\right).$$

Этап 3. При решении научной задачи разработки методики определения баллистической структуры МКА на круговых орбитах воспользуемся методическим подходом, который позволяет получить аналитические соотношения для случая движущихся в разных орбитальных плоскостях МКА. Суть обозначенного подхода заключается в использовании того факта, что линия визирования двух заданных МКА всегда перемещается в пространстве параллельно некоторой плоскости – псевдоэкватору [14]. Так, на рис. 2. показано расположение МКА-1, 2 в разных плоскостях. Дуги NB_1 и NB_2 являются меридианами точек расположения МКА-1-2 и пересекают экватор под прямым углом, дуга NB' – вспомогательная и является биссектрисой угла B_1NB_2 , i^* – наклонение псевдоэкватора.

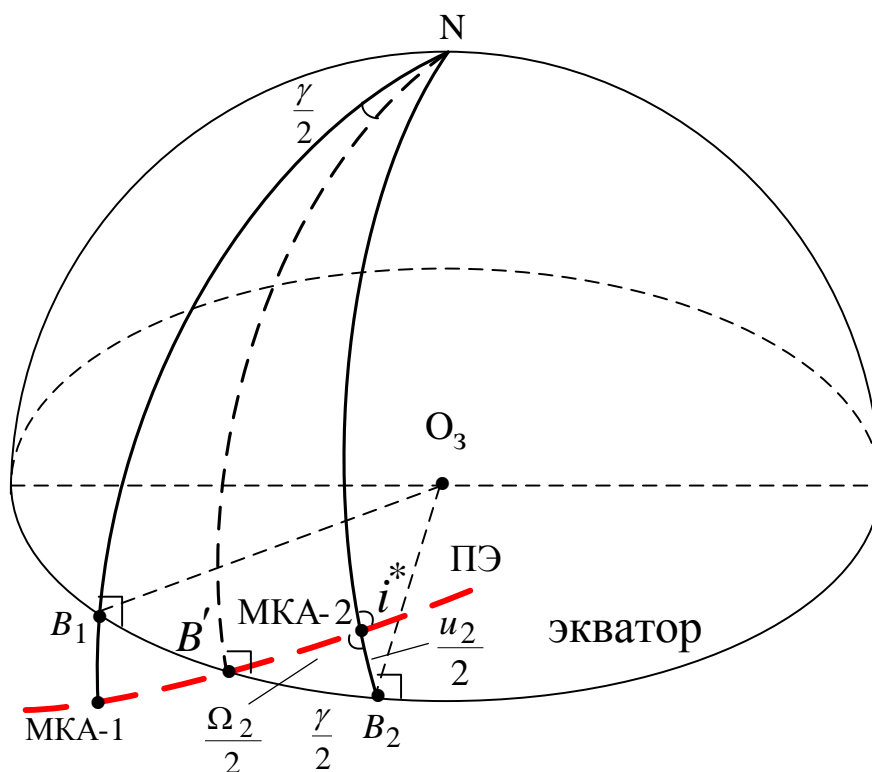


Рис. 2. К определению угла наклона плоскости орбиты к псевдоэкватору

Используя рис. 2, по теореме синусов для сферического прямоугольного треугольника получим следующие выражения:

$$\frac{\sin i^*}{\sin \frac{\gamma}{2}} = \frac{\sin \frac{\pi}{2}}{\sin \frac{l_{\max}}{2}}, \quad (3)$$

$$\cos \frac{l_{\max}}{2} = \cos \frac{\gamma}{2} \cos \frac{u_2}{2}. \quad (4)$$

Этап 4. Рассмотрим расположение кластера МКА в окрестностях точки вертекса (рис. 3). Обозначим предельные значения углов в сферическом прямоугольном треугольнике АВС через $\frac{l_{\max}}{2}$ и $\frac{l_{\min}}{2}$ соответственно.

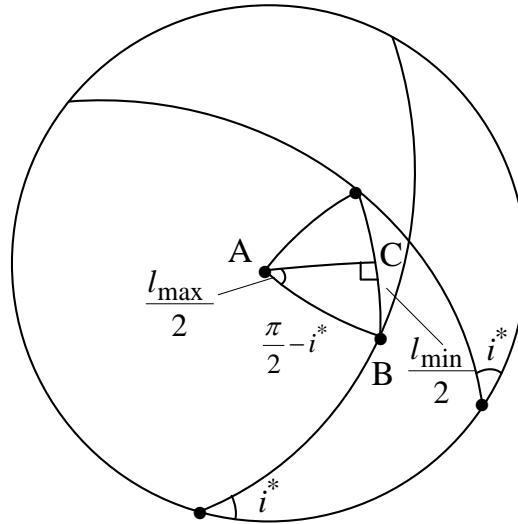


Рис. 3. Расположение кластера МКА в окрестностях точки вертекса

Тогда, используя рис. 3, по теореме синусов для сферического треугольника ABC получим следующее выражение для расчета наклона псевдоэкватора:

$$\cos i^* = \frac{\sin \frac{l_{\min}}{2}}{\sin \frac{l_{\max}}{2}}. \quad (5)$$

Для определения прямого восхождения восходящего узла МКА-2 рассмотрим прямоугольный треугольник AB_1C (рис. 4). Используя теорему синусов, получим следующее выражение

$$\sin \frac{\Omega_2}{2} = \frac{\sin \frac{\gamma}{2}}{\sin i^*}. \quad (6)$$

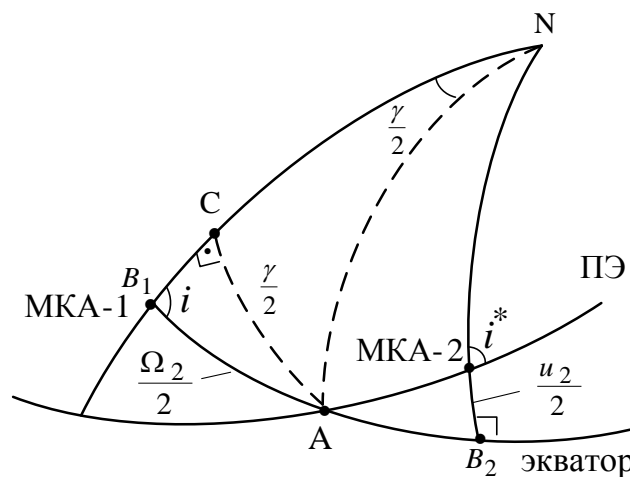


Рис. 4. К определению прямого восхождения восходящего узла орбиты КА-2

Обобщим полученные аналитические соотношения. Итак, вначале по формуле (5) найдем наклонение плоскости псевдоэкватора i^* . Затем по формуле (3) – вспомогательный угол γ , а используя выражение (5), – аргумент широты второго МКА. В заключение по формуле

(6) рассчитаем прямое восхождение восходящего узла второго МКА. Последовательность действий повторяется для нахождения положения третьего МКА.

ПРИКЛАДНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МЕТОДИКИ. МНОЖЕСТВО ДОПУСТИМЫХ ВАРИАНТОВ БАЛЛИСТИЧЕСКИХ СТРУКТУР КЛАСТЕРА МКА

Рассмотрим множество вариантов баллистических структур кластера МКА. Как видно из приведенной методики, основными параметрами, влияющими на существование решения, являются не только величины d_{\min} , d_{\max} из ограничения (2), а также их отношение, т. е. $\frac{d_{\max}}{d_{\min}}$.

Причем возможно такое соотношение $\frac{d_{\max}}{d_{\min}}$, при котором варианты баллистических структур на круговых орбитах, обеспечивающие требование (2), будут отсутствовать и поиск будет необходимо вести на эллиптических орбитах [12, 13].

На рис. 5 представлена зависимость отношения $\frac{d_{\max}}{d_{\min}}$ от наклона псевдоэкватора. Таким образом, чем больше отличие фактического наклона плоскости орбиты к экватору от наклона к псевдоэкватору, тем меньше область нахождения множества баллистических структур.

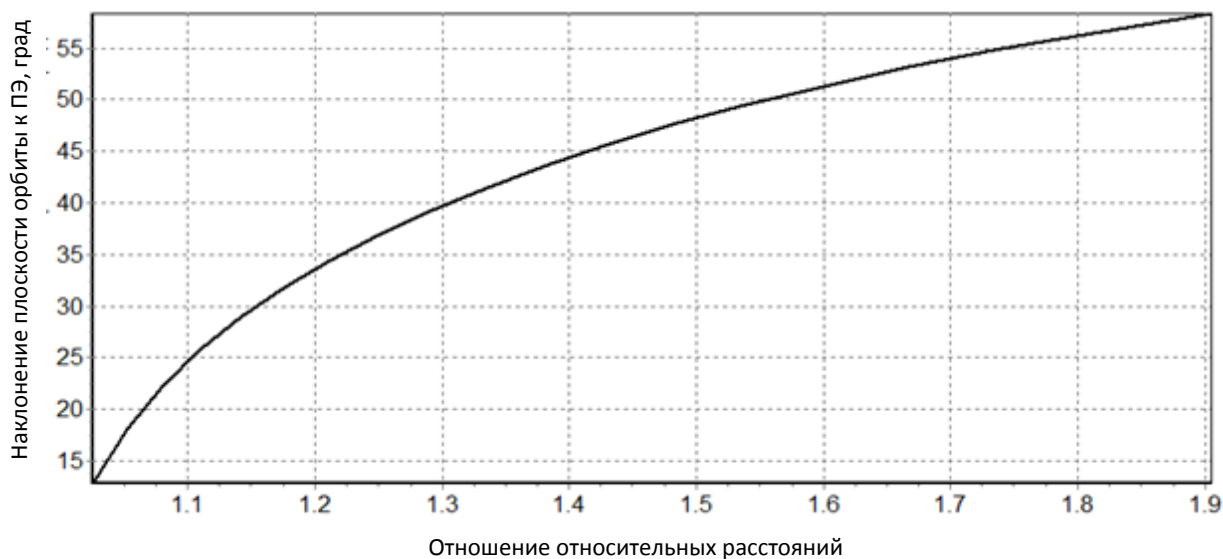


Рис. 5. Зависимость наклона плоскости псевдоэкватора от отношения относительных расстояний

Рассмотрим пример поиска баллистической структуры на круговых орбитах радиусом $r = 7371$ км, которая обеспечит устойчивое движение МКА в составе кластера в следующем интервале относительных расстояний: $d_{\min} = 100$ км, $d_{\max} = 200$ км.

В табл. 1 приведены варианты баллистических структур кластера МКА для разных наклонов орбиты, а на рис. 6 – характеристики движения МКА в составе кластера для баллистической структуры кластера с параметрами $u_2=1,35^0$, $\Omega_2=0,04^0$, $u_3=0,301^0$, $\Omega_3=0,884^0$ при наклонении орбиты $i=63^0$.

Таблица 1

**Варианты баллистических структур кластера МКА
для разных наклонений орбиты**

i , град	u_2 , град	Ω_2 , град	u_3 , град	Ω_3 , град
60	1,45	0,02	0,301	0,763
63	1,35	0,04	0,301	0,884
65	1,45	0,05	0,301	1,08
70	1,33	0,02	0,25	1,38
75	1,25	0,018	0,37	1,285

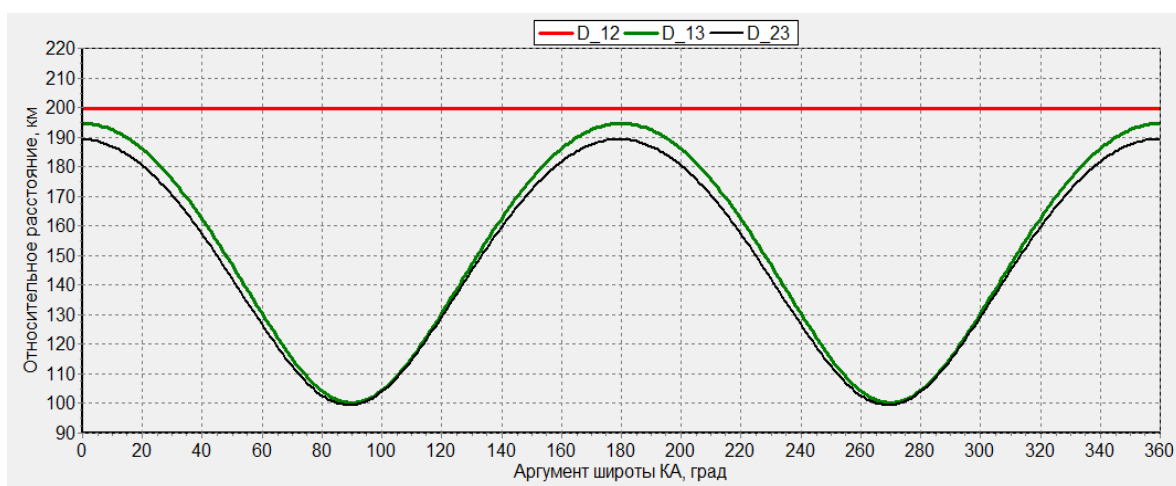


Рис. 6. Характеристики относительного движения МКА в составе кластера

С другой стороны, используя вышеприведенную методику, можно получить область допустимых решений баллистических структур графоаналитически, т. е. построив границы областей для возможных баллистических структур кластера МКА (рис. 7).

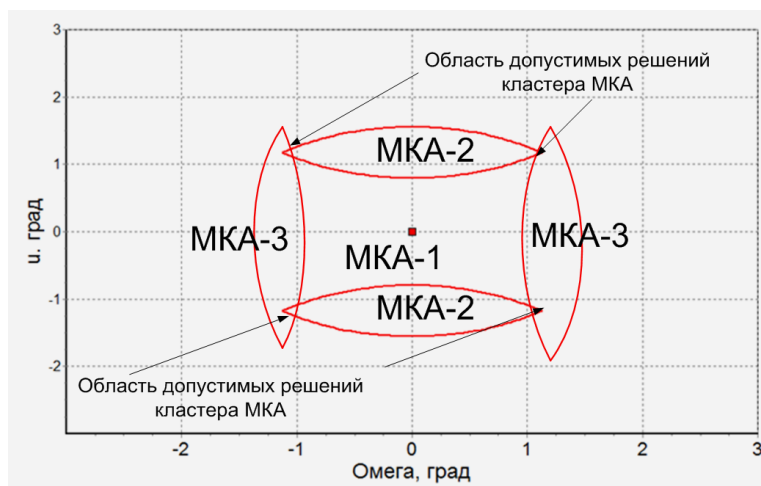


Рис. 7. Область допустимых решений кластера МКА

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, рассмотренная методика определения баллистической структуры МКА на круговых орбитах позволяет обосновать баллистическую структуру кластера МКА для частного случая движения МКА на круговых орбитах, которые в первом приближении являются структурно устойчивыми.

Полученные аналитические соотношения позволяют проводить анализ и обоснование баллистических структур совместно с выбором и обоснованием параметров орбит для различных высот и наклонений, что существенно упрощает основные этапы баллистического проектирования такого класса систем МКА.

Список используемых источников

1. *Потюпкин А. Ю., Данилин Н. С., Селиванов А. С.* Кластеры малоразмерных космических аппаратов как новый тип космических объектов // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2017. – Т. 4, вып. 4. – С. 45–56. – DOI: 10.17238/issn2409-0239.2017.4.45.
2. *Макриденко Л. А., Минаев И. В., Потюпкин А. Ю.* Концептуальные особенности повышения целевой эффективности малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Вопросы электромеханики: тр. ВНИИЭМ. – 2014. – Т. 141, № 4. – С. 17–22.
3. Синтез структуры цифрового углового дискриминатора радиолокационной станции с фазированной антенной решеткой / В. В. Пятков [и др.] // Радиотехника. – 2016. – № 9. – С. 156–164.
4. *Варфоломеев В. С.* Влияние формы обзора на эффективность обзора Земли космическим аппаратом радиолокационного наблюдения // Вестник СибГАУ. – 2017. – Т. 18, № 1. – С. 118–122.
5. *Болсуновский М. А.* Данные дистанционного зондирования Земли высокого разрешения. Ближайшие перспективы // Геопрофи. – 2006. – № 2. – С. 13–15.
6. *Горелов В. А., Лукашевич Е. Л., Стрельцов В. А.* Развитие космических средств ДДЗ // Новости космонавтики. – 2004. – № 6(229). – С. 34–52.
7. Расчет систем космических аппаратов на эллиптических орбитах для непрерывного обзора широтного пояса Земли с помощью радиолокационной аппаратуры / Н. Ф. Аверкиев [и др.] // Космонавтика и ракетостроение. – К.: ЦНИИмаш, 2018. – Вып. 5 (104). – С. 63–71.
8. *Бирюков А. В.* Синтез многоцелевых орбитальных структур космических аппаратов ДДЗ // Перспективные информационные технологии-2014: тр. Международн. научно-техн. конф. Самара, 30 июня–4 июля 2014 г. – С. 441–442.
9. *Лобанов А. Г., Семункина В. И.* К вопросу о баллистическом построении при проведении интерферометрической съемки // Космонавтика и ракетостроение. – 2012. – № 5. – С. 41–47.
10. *Fiedler H., Krieger G.* Close formation flight of passive receiving micro-satellites // The 18th International Symposium on Space Flight Dynamics, Munich, Germany, 11–15 October 2004. – P. 207–219.
11. *Палкин М. В.* Некоторые аспекты формирования групп космических аппаратов и управления ими // Вестник Московского авиационного института. – 2014. – Т. 21, № 3. – С. 29–35.
12. Баллистические основы проектирования ракет-носителей и спутниковых систем / Н. Ф. Аверкиев [и др.]. – СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2017. – 302 с.
13. Формирование структуры баллистически связанной группы космических аппаратов дистанционного зондирования Земли / Н. Ф. Аверкиев [и др.] // Научные технологии в космических исследованиях Земли. – 2016. – Т. 8, № 4. – С. 11–16.

14. *Горбулин В. И.* Новый способ оптимизации орбитального построения глобальных спутниковых систем // Полет. – 2001. – № 12. – С. 20–26.

15. *Поповкин В. А., Горбулин В. И.* Обоснование нового способа орбитального построения спутниковых систем для повышения качества космического информационного обеспечения // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2011. – Вып. 632. – С. 100–103.

16. *Фадин И. А., Горбулин В. И., Матвеев А. А.* Модель орбитальной системы мониторинга космической обстановки, построенной на круговых орбитах равного радиуса // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2018. – Вып. 7. – С. 290–304.

А. В. Евтеев,
кандидат технических наук;
Г. Н. Мальцев,
доктор технических наук, профессор

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРЯДКА АСТАТИЗМА СЛЕДЯЩИХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ ЗАДЕРЖКИ И ФАЗЫ ШУМОПОДОБНОГО ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННОГО СИГНАЛА В СИСТЕМЕ СИНХРОНИЗАЦИИ СПУТНИКОВОЙ РАДИОЛИНИИ

Проведен анализ динамики изменения параметров шумоподобного фазоманипулированного сигнала, принимаемого в спутниковой радиолнии. Изложен методический подход к определению порядка астатизма следящих измерителей задержки и фазы системы синхронизации приемной радиоэлектронной системы спутниковой радиолнии. Проведен сравнительный анализ систем синхронизации с астатизмом второго и третьего порядка. Обосновано использование в спутниковых радиолниях при связи с низкоорбитальными космическими аппаратами следящего измерителя задержки второго порядка и следящего измерителя фазы с управляемой структурой, включающего второй или третий порядок астатизма в зависимости от условий приема сигналов и этапа синхронизации.

Ключевые слова: шумоподобный фазоманипулированный сигнал, следящие измерители, слежение за задержкой и фазой, система синхронизации, астатизм, управляемая структура.

ВВЕДЕНИЕ

В спутниковых радиолниях широкое распространение получает использование шумоподобных фазоманипулированных сигналов. Они используются в системах спутниковой навигации и в их функциональных дополнениях, системах спутниковой связи и управления космическими аппаратами (КА) [1–4]. Орбитальное движение КА приводит к непрерывному изменению задержки, частоты и фазы сигналов, принимаемых в спутниковых радиолниях «земля–борт» и «борт–земля». Слежение за параметрами принимаемых сигналов необходимо для реализации оптимального приема и достижения потенциальной помехоустойчивости радиоэлектронных систем (РЭС) спутниковых радиолний [5, 6]. Для слежения за параметрами принимаемых сигналов в РЭС используются системы синхронизации [6–8]. В радиолниях с шумоподобными фазоманипулированными сигналами в качестве основной задачи системы синхронизации, как правило, рассматривается слежение за задержкой и фазой принимаемого сигнала [6, 7]. Это обусловлено малой шириной полосы захвата схемы слежения за задержкой, соизмеримой с длительностью символа модулирующей псевдослучайной последовательности, и использованием оценки фазы принимаемого сигнала для уточнения оценки задержки.

Основным показателем качества функционирования системы синхронизации является точность определения отслеживаемых параметров сигнала. При этом структура следящих измерителей системы синхронизации не зависит от вида отслеживаемых параметров, а зависит от динамики их изменения и требуемой точности слежения. При слежении за изменяющимися во времени параметрами сигнала основным параметром следящего измерителя является порядок его астатизма. В спутниковых радиолниях наибольшая динамика изменения параметров принимаемых сигналов имеет место при связи с низкоорбитальными КА, в этом случае требуется наибольший порядок астатизма следящих измерителей. В настоящей статье изложен общий подход к определению порядка астатизма следящих измерителей параметров сигналов и обоснованы варианты использования следящих измерителей задержки и фазы

второго и третьего порядка в системе синхронизации приемной РЭС спутниковой радиолнии при связи с низкоорбитальными КА.

ОБЩИЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПОРЯДКА АСТАТИЗМА СЛЕДЯЩИХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ

Задача слежения за параметрами принимаемого сигнала в РЭС является задачей непрерывного оценивания параметров сигнала, которое осуществляется фильтрами (экстраполяторами) следящих измерителей системы синхронизации. Основным параметром следящего измерителя является порядок астатизма фильтра, который определяется числом входящих в состав фильтра интеграторов. Необходимость построения фильтров следящих измерителей на основе одного или нескольких интеграторов обусловлена тем, что именно интеграторы обеспечивают слежение за изменением оцениваемого параметра сигнала – обработку его изменения во времени, и чем выше порядок астатизма фильтра, тем более сложные изменения оцениваемого параметра сигнала он может обрабатывать.

Пусть входной процесс следящего измерителя характеризуется функцией $\lambda(t)$, описывающей изменение во времени оцениваемого параметра сигнала. Для обоснования требований к порядку астатизма следящего измерителя функцию $\lambda(t)$ на интервале анализа можно представить в виде разложения в ряд Тейлора:

$$\lambda^*(t) = \lambda_0 + \lambda' t + \lambda'' t^2/2 + \dots + \lambda^{(n)} t^n/n! , \quad (1)$$

- где λ_0 – постоянная составляющая функции изменения параметра сигнала;
 λ' – первая производная функции изменения параметра сигнала (скорость изменения параметра);
 λ'' – вторая производная функции изменения параметра сигнала (ускорение изменения параметра);
 $\lambda^{(n)}$ – n -я производная изменения параметра сигнала.

Тогда фильтр следящего измерителя параметра сигнала должен формировать оптимальные оценки $\hat{\lambda}_0, \hat{\lambda}', \hat{\lambda}'', \dots, \hat{\lambda}^{(n)}$ величин $\lambda_0, \lambda', \lambda'', \dots, \lambda^{(n)}$, входящих в выражение (1), и на их основе – оптимальную оценку

$$\hat{\lambda}^*(t) = \hat{\lambda}_0 + \hat{\lambda}' t + \hat{\lambda}'' t^2/2 + \dots + \hat{\lambda}^{(n)} t^n/n! \quad (2)$$

Функция вида t^k/k имеет изображение по Лапласу $(1/p)^{k+1}$, поэтому фильтр следящего измерителя, обрабатывающий изменение оцениваемого параметра $\lambda(t)$ до n -й производной включительно, должен включать $(n+1)$ интеграторов. Каждый интегратор, входящий в состав фильтра, имеет коэффициент передачи $1/p$ и обрабатывает оценку одного из коэффициентов $\hat{\lambda}_0, \hat{\lambda}', \hat{\lambda}'', \dots, \hat{\lambda}^{(n)}$ в разложении (2), соответствующих функциям времени $1, t, t^2/2!, \dots, t^n/n!$. При этом порядком функции времени определяется число интеграторов, необходимых для обработки оценки соответствующего коэффициента.

Число интеграторов, входящих в состав фильтра следящего измерителя, определяет порядок астатизма следящего измерителя. Астатизм m оптимального следящего измерителя должен быть на единицу выше номера высшей производной n , содержащейся в разложении вида (1) функции изменения параметра оцениваемого сигнала: $m=n+1$. При входном процессе, имеющем порядок n , и порядке астатизма следящего измерителя $m=n+1$ в установившемся режиме обеспечивается воспроизведение входного процесса с точностью до шумовой (случайной) ошибки с нулевой динамической (систематической) ошибкой [9]. В случае, если следящий фильтр не является оптимальным и порядок астатизма меньше требуемого ($m < n+1$), то обработка старших членов разложения оказывается невозможна и появляется

динамическая (систематическая) ошибка фильтрации. Но если порядок астатизма следящего измерителя избыточен ($m > n + 1$), то система синхронизации становится излишне сложной, увеличивается шумовая полоса пропускания фильтра $\Delta f_{ш}$, что приводит к увеличению шумовой (случайной) ошибки фильтрации.

Динамическая (систематическая) составляющая ошибки следящего измерителя характеризует ошибку слежения в установившемся режиме после завершения в следящем измерителе переходных процессов. Величина динамической ошибки в зависимости от соотношения между порядком изменения входного воздействия n и порядком астатизма следящего измерителя m может быть либо нулевой, либо отличной от нуля постоянной величиной, либо некоторой функцией времени. Во всех случаях, когда динамическая ошибка слежения за параметрами принимаемых сигналов не равна нулю, имеет место отклонение от их оптимальной обработки. Поэтому порядок астатизма следящих измерителей является одним из основных параметров системы синхронизации. В связи с этим были проанализированы варианты выбора порядка астатизма следящих измерителей системы синхронизации РЭС при слежении за задержкой и фазой принимаемого сигнала в условиях, характерных для спутниковых радиолиний при связи с низкоорбитальными КА. Слежение за этими параметрами осуществляется в большинстве систем синхронизации РЭС с шумоподобными фазоманипулированными сигналами.

В технических решениях для систем синхронизации наземных и бортовых РЭС спутниковых радиолиний «земля – борт» и «борт – земля», как правило, выбирается первый или второй порядок астатизма для систем слежения за задержкой сигнала и второй или третий порядок астатизма для систем фазовой автоподстройки [10–11]. Проведенный анализ позволил уточнить требования к порядку астатизма следящих измерителей задержки и фазы для РЭС спутниковых радиолиний при связи с низкоорбитальными КА с высотой орбиты до 1000 км. Поскольку с увеличением высоты орбиты КА динамика изменения параметров принимаемых сигналов в спутниковых радиолиниях уменьшается, рассмотренные варианты использования следящих измерителей задержки и фазы второго и третьего порядка в системе синхронизации приемной РЭС спутниковой радиолинии гарантированно обеспечивают нулевую динамическую ошибку слежения при связи с КА на более высоких орбитах.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРЯДКА АСТАТИЗМА СЛЕДЯЩИХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ ЗАДЕРЖКИ И ФАЗЫ ШУМОПОДОБНОГО ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННОГО СИГНАЛА

Характер изменения параметров принимаемых сигналов в спутниковых радиолиниях «земля–борт» и «борт–земля» определяется динамикой движения КА относительно наземной РЭС. Чаще всего при радиосвязи наземной РЭС с низкоорбитальными КА, движущимися в общем случае по эллиптическим орбитам, часть траектории КА в пределах зоны радиовидимости РЭС близка к траектории движения КА по круговой орбите. Поэтому для описания движения КА в зоне радиовидимости наземной РЭС будем рассматривать невозмущенное движение КА по круговой орбите с высотой $H_{КА}$, центр которой совпадает с центром Земли.

В случае невозмущенного движения КА по круговой орбите высотой $H_{КА}$ изменение дальности до КА – R в зависимости от времени t при зенитном прохождении КА в зоне радиовидимости РЭС описывается выражением [12]

$$R(t) = \sqrt{R_3^2 + (R_3 + H_{КА})^2 - 2R_3(R_3 + H_{КА}) \cos \left(\sqrt{\frac{\mu}{R_3 + H_{КА}}} \frac{t - t_0}{R_3 + H_{КА}} \right)}, \quad (3)$$

где R_3 – радиус Земли;

μ – гравитационная постоянная, $\mu = 3,986 \cdot 10^5 \text{ км}^3/\text{с}^2$;

t_0 – время прохождения КА точки траверза (точки орбиты, ближайшей к наземному пункту, в котором находится РЭС).

При зенитном прохождении КА имеют место максимальное время его нахождения в зоне радиовидимости РЭС, которое составляет

$$2(t-t_0)_{\max} = 2(R_3 + H_{\text{КА}}) \sqrt{\frac{R_3 + H_{\text{КА}}}{\mu}} \arccos\left(\frac{R_3}{R_3 + H_{\text{КА}}}\right), \quad (4)$$

и наиболее широкий диапазон изменения дальности R и радиальной скорости V_R – параметров движения КА, определяющих изменение параметров принимаемых сигналов. Соответственно, в этом случае имеет место и наиболее широкий диапазон изменения параметров сигнала, связанных с дальностью R и радиальной скоростью V_R КА – задержки $\tau=R/c$ и доплеровского сдвига частоты $F_d = -f_0 V_R/c$, где c – скорость света, f_0 – несущая частота радиосигнала. Выражение (4) соответствует определению времени нахождения КА над линией местного горизонта пункта расположения РЭС.

Изменение задержки сигнала наиболее значительно при входе КА в зону радиовидимости и при выходе из зоны радиовидимости РЭС. Наиболее важным является начальный участок траектории КА после входа в зону радиовидимости, на котором, как правило, происходят вхождение в связь с КА и начальная синхронизация. Для выбора параметров следящего измерителя задержки существенное значение имеют характер и диапазон изменения во времени задержки сигнала $\tau(t)$.

На рис. 1 представлены зависимости задержки сигнала от времени $\tau(t)=R(t)/c$ на начальном 60-секундном интервале нахождения низкоорбитальных КА в зоне радиовидимости наземной РЭС, рассчитанные в соответствии с выражением (3) для $R(t)$ при различной высоте орбиты $H_{\text{КА}}$. Момент времени $t=0$ соответствует прохождению КА линии местного горизонта. Кривая 1 соответствует $H_{\text{КА}}=250$ км, кривая 2 – $H_{\text{КА}}=500$ км, кривая 3 – $H_{\text{КА}}=1000$ км. Приведенные зависимости показывают, что на анализируемом участке траектории КА в зоне радиовидимости РЭС изменение задержки сигнала от времени $\tau(t)$ имеет практически линейный характер. Это подтверждается представленными на рис. 2 зависимостями изменения во времени производной задержки сигнала $d\tau(t)/dt$, характеризующими скорость изменения задержки сигнала $V_\tau = V_R/c$. Кривая 1 соответствует $H_{\text{КА}}=250$ км, кривая 2 – $H_{\text{КА}}=500$ км, кривая 3 – $H_{\text{КА}}=1000$ км. Производные $d\tau(t)/dt$ на анализируемом интервале практически не изменяются, что подтверждает близкий к линейному характеру изменения во времени задержки сигнала. Отметим, что зависимости для высоты орбиты $H_{\text{КА}}=250$ км соответствуют максимально возможной скорости изменения задержки принимаемого сигнала при связи КА с наземными РЭС, поскольку более низкие высоты орбит на практике не используются, а с увеличением высоты орбиты характер изменения во времени дальности до КА сохраняется, ее абсолютные значения увеличиваются и скорость изменения уменьшается.

Анализ линейной аппроксимации на 60-секундном интервале времени зависимостей $\tau(t)$, представленных на рис. 1, показывает, что максимальное отклонение аппроксимирующей функции вида $\tau^*(t)=v_0+v_1t$, где v_0 и v_1 – весовые коэффициенты, найденные методом наименьших квадратов, от действительных значений функции $\tau(t)$ составляет сотые доли процента: около 0,02% при $H_{\text{КА}}=250$ км, около 0,01% при $H_{\text{КА}}=500$ км, около 0,005% при $H_{\text{КА}}=1000$ км.

Практически для работы следящего измерителя задержки, имеющего эквивалентную полосу пропускания замкнутого контура в единицы герц, существенными являются гораздо более короткие интервалы времени, чем рассмотренный 60-секундный интервал, а с уменьшением анализируемого интервала времени отклонение линейной аппроксимирующей функции

вида $\tau^*(t)=v_0+v_1t$ от действительных значений функции $\tau(t)$ будет еще меньше. При этом скорость изменения задержки сигнала V_τ и погрешность линейной аппроксимации функции $\tau(t)$ уменьшаются с увеличением высоты орбиты КА. Поэтому при выборе параметров следящего измерителя задержки можно обоснованно полагать, что изменение измеряемого параметра – задержки сигнала – с учетом реальной динамики движения КА является линейным.

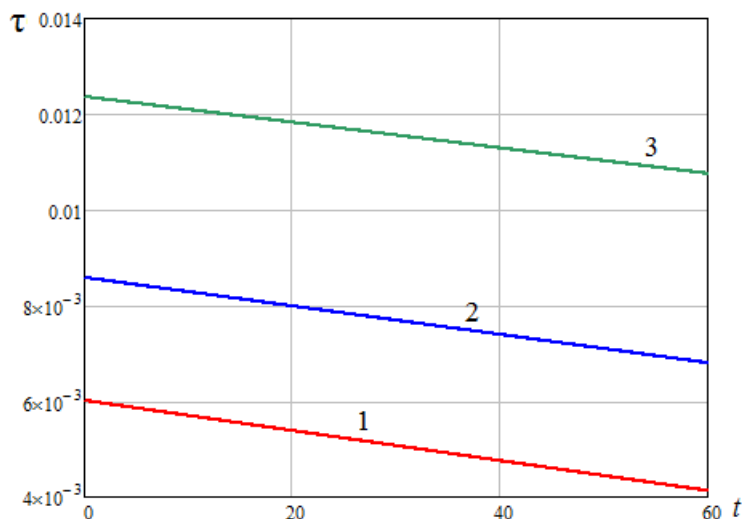


Рис. 1. Зависимости задержки сигнала на начальном этапе прохождения КА в зоне радиовидимости РЭС от времени

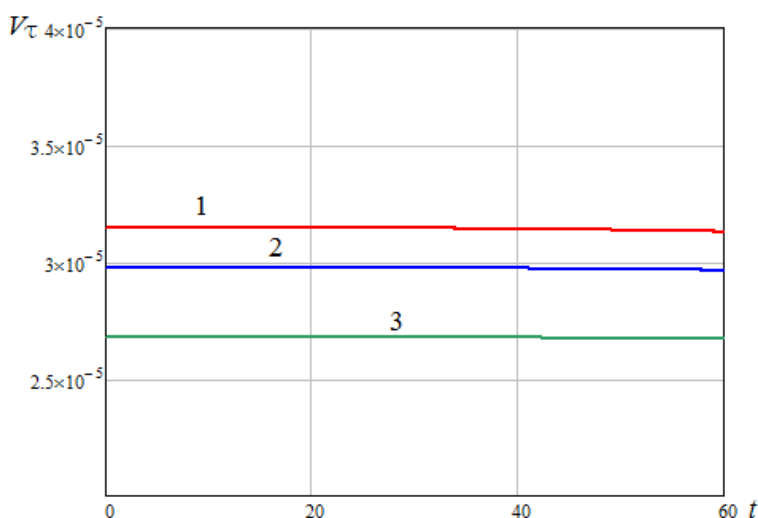


Рис. 2. Зависимости изменения во времени производной задержки сигнала, характеризующие скорость изменения задержки сигнала

При линейном изменении задержки принимаемого сигнала входной процесс следящего измерителя имеет порядок $n=1$, и фильтр следящего измерителя задержки должен иметь порядок астатизма $m=2$. При пренебрежении влияния составляющих функции $\tau(t)$, не учтенных при ее линейной аппроксимации $\tau^*(t)$, можно полагать, что в таком следящем измерителе при оптимальной оценке задержки принимаемого сигнала по критерию максимального правдоподобия в условиях белого гауссовского шума обеспечивается минимум случайной ошибки слежения за задержкой с нулевой систематической ошибкой. Поэтому в рассматриваемой задаче в следящем измерителе задержки системы синхронизации РЭС спутниковой радиосвязи необходимо использовать фильтр с астатизмом порядка $m=2$.

При реализации систем фазовой синхронизации наибольшее распространение в РЭС различного назначения, в том числе в РЭС спутниковых радиолиний, получают системы с астатизмом порядка $m=2$ и $m=3$ [6, 13]. В ряде случаев предпочтение отдается системам фазовой синхронизации с астатизмом второго порядка как более простым в технической реализации, и осуществляется оптимизация их параметров для достижения предельных возможностей следящих систем с астатизмом второго порядка по точности слежения за фазой [7, 8, 14]. Системы фазовой синхронизации с астатизмом третьего порядка имеют более высокие предельные возможности по точности слежения за фазой, но являются более сложными в технической реализации, а достижение их предельных возможностей связано с необходимостью подбора параметров дискриминатора и фильтра с учетом ряда ограничений [7, 8]. Поэтому для обоснования типа схемы слежения за фазой системы синхронизации РЭС необходимо провести сравнительный анализ систем фазовой синхронизации с астатизмом второго и третьего порядка по точности слежения за фазой. При этом следует учитывать как потенциальные возможности, так и реально достижимые показатели качества функционирования рассматриваемых вариантов построения следящего измерителя. К числу таких показателей относятся: устойчивость, шумовая (случайная) составляющая ошибки слежения, динамическая (систематическая) составляющая ошибки слежения и время установления режима синхронизма.

Основным параметром системы синхронизации с точки зрения реализации оптимального приема сигналов является величина динамической (систематической) ошибки слежения. В общем случае динамическая ошибка следящей системы рассчитывается с помощью коэффициентов ошибок, а для оценочных расчетов достаточно учитывать первый отличный от нуля коэффициент ошибок [8]. Для следящей системы с астатизмом второго порядка и оптимизированными параметрами динамическая ошибка слежения за фазой определяется выражением:

$$\delta\varphi(t) = 0,25\varphi''(t)/\Delta f_{\text{ш}}^{(2)2}, \quad (5)$$

а для следящей системы с астатизмом третьего порядка и оптимизированными параметрами динамическая ошибка слежения за фазой определяется выражением

$$\delta\varphi(t) = 0,72\varphi'''(t)/\Delta f_{\text{ш}}^{(3)3}. \quad (6)$$

В выражениях (5) и (6) $\varphi''(t) = \frac{d^2\varphi(t)}{dt^2}$ и $\varphi'''(t) = \frac{d^3\varphi(t)}{dt^3}$ – вторая и третья производные

функции, описывающие изменение фазы входного сигнала $\varphi(t)$, а $\Delta f_{\text{ш}}^{(2)}$ и $\Delta f_{\text{ш}}^{(3)}$ – шумовые полосы пропускания систем фазовой синхронизации с астатизмом второго и третьего порядка соответственно.

При прохождении КА в зоне радиовидимости наземной РЭС изменение фазы принимаемого сигнала в спутниковой радиолинии $\varphi(t)$ в зависимости от времени может быть представлено выражением [15]

$$\varphi^*(t) = \varphi_0 + 2\pi F_{\text{д}}(t)t + \pi F_{\text{д}}'(t)t^2 \quad (7)$$

где φ_0 – начальная фаза сигнала;

$F_{\text{д}}(t)$ – значение доплеровского сдвига частоты в момент времени t ;

$F_{\text{д}}'(t)$ – производная доплеровского сдвига частоты, характеризующая скорость

его изменения в момент времени t , при этом $F_{\text{д}}'(t) = \frac{dF_{\text{д}}(t)}{dt}$.

В соответствии с выражением (7) фаза входного сигнала $\varphi(t)$ в зависимости от времени определяется характером изменения во времени доплеровского сдвига частоты $F_{\text{д}}(t)$. При связи наземной РЭС с КА доплеровский сдвиг частоты принимаемого сигнала $F_{\text{д}}$ зависит от радиальной скорости движения КА V_R . Поскольку величина доплеровского сдвига частоты

F_d прямо пропорциональна (с точностью до знака) радиальной скорости КА V_R , зависимость $F_d(t)$ полностью определяется зависимостью $V_R(t)$.

Рассмотрим характер зависимости радиальной скорости КА V_R от времени t при невозмущенном движении КА по круговой орбите высотой $H_{КА}$, центр которой совпадает с центром Земли. Изменение радиальной скорости КА при зенитном прохождении КА в зоне радиовидимости РЭС описывается выражением [12]

$$V_R(t) = \sqrt{\frac{\mu}{R_3 + H_{КА}}} \frac{R_3 \sin \left[\sqrt{\frac{\mu}{R_3 + H_{КА}}} \frac{t - t_0}{R_3 + H_{КА}} \right]}{\sqrt{R_3^2 + (R_3 + H_{КА})^2 - 2R_3(R_3 + H_{КА}) \cos \left[\sqrt{\frac{\mu}{R_3 + H_{КА}}} \frac{t - t_0}{R_3 + H_{КА}} \right]}}. \quad (8)$$

В выражение (8) для зависимости $V_R(t)$ входят те же параметры, что и в выражение (3) для зависимости $R(t)$. При зенитном прохождении КА в зоне радиовидимости РЭС имеет место наиболее широкий диапазон изменения радиальной скорости КА V_R и, соответственно, доплеровского сдвига частоты принимаемого сигнала F_d .

На рис. 3 показана рассчитанная в соответствии с выражением (8) зависимость радиальной скорости КА от времени $V_R(t)$ при прохождении КА в зоне радиовидимости РЭС с высотой орбиты $H_{КА}=250$ км. Как отмечалось ранее, более низкие высоты орбит КА на практике не используются, а с увеличением высоты орбиты характер изменения во времени радиальной скорости КА сохраняется, а ее абсолютные значения и скорость изменения уменьшаются. Поэтому приведенная зависимость характеризует практически весь диапазон возможных изменений радиальной скорости низкоорбитальных КА при связи с наземными РЭС. Момент времени $t=0$ соответствует прохождению КА линии местного горизонта при входе в зону радиовидимости РЭС. Наибольшая скорость изменения радиальной скорости КА имеет место вблизи точки траверза в момент времени $t=t_0$.

На рис. 4 показан фрагмент зависимости $V_R(t)$, представленной на рис. 3, на 12-секундном интервале, середина которого совпадает с моментом прохождения точки траверза $t=t_0$. На этом интервале радиальная скорость КА является максимальной.

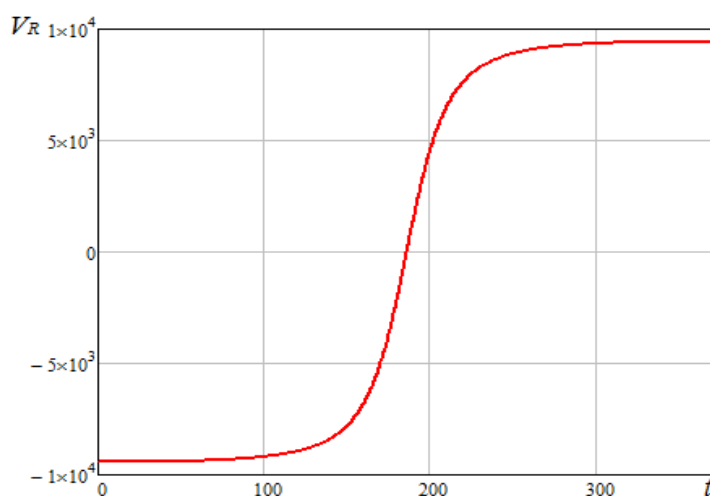


Рис. 3. Зависимость радиальной скорости КА при прохождении в зоне радиовидимости РЭС от времени

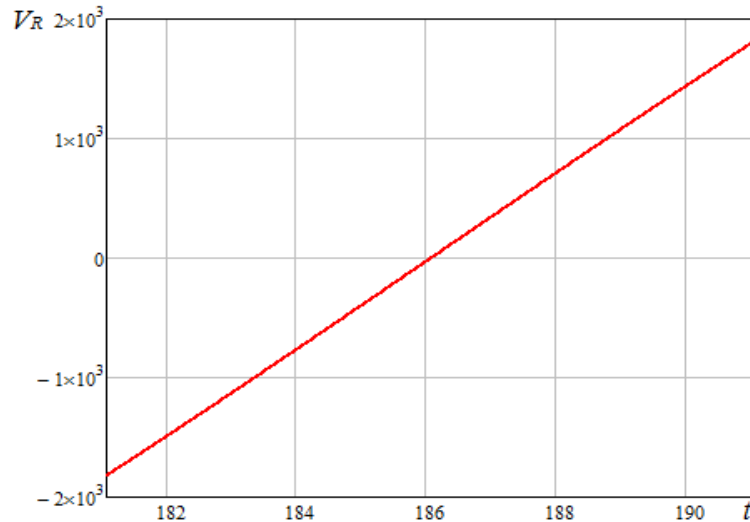


Рис. 4. Зависимость радиальной скорости КА при прохождении вблизи точки траверза от времени

Представленные зависимости показывают, что на анализируемом участке траектории КА в зоне радиовидимости РЭС изменение радиальной скорости от времени $V_R(t)$ имеет практически линейный характер. Поскольку данный участок траектории КА характеризуется самым динамичным изменением радиальной скорости, то в выражении (7) производную доплеровского сдвига частоты можно полагать постоянной: $F'_d(t) = b$. При этом величина константы b , соответствующей скорости изменения доплеровского сдвига частоты, зависит от участка траектории КА в зоне радиовидимости РЭС, но для любого участка траектории уравнение (7) будет уравнением второй степени. Тогда $\varphi'''(t) = 0$ и для следящей системы с астатизмом третьего порядка $\delta\varphi(t) = 0$, а $\varphi''(t) \neq 0$ и для следящей системы с астатизмом второго порядка $\delta\varphi(t) \neq 0$. В последнем случае динамическая ошибка постоянная ($\delta\varphi = \text{const}$), но при этом $\delta\varphi \neq 0$.

При принятых допущениях в системах фазовой синхронизации с астатизмом второго порядка имеет место ненулевая динамическая ошибка слежения за фазой, а в системах фазовой синхронизации с астатизмом третьего порядка она отсутствует. При более точном описании изменения функции $\varphi(t)$ для следящих систем с астатизмом третьего порядка $\varphi'''(t) \neq 0$ и, соответственно, $\delta\varphi(t) \neq 0$. Однако при $\Delta f_{\text{ш}}^{(2)} = \Delta f_{\text{ш}}^{(3)} = \Delta f_{\text{ш}}$ в широком диапазоне условий функционирования систем фазовой синхронизации выполняется $\varphi'''(t)/\Delta f_{\text{ш}} \ll \varphi''(t)$, и в системах фазовой синхронизации с астатизмом третьего порядка динамическая составляющая ошибки слежения за фазой меньше, чем в системах фазовой синхронизации с астатизмом второго порядка. Поэтому в рассматриваемой задаче в качестве основного варианта построения следящего измерителя фазы следует рассматривать использование в нем фильтра с астатизмом порядка $m=3$.

СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ ФИЛЬТРОВ СЛЕДЯЩИХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ ЗАДЕРЖКИ И ФАЗЫ

Структурная схема фильтра слежения за задержкой с астатизмом $m=2$, включающего два интегратора ($1/p$), представлена на рис. 5. Использовано представление структуры фильтра и его элементов в соответствии с работой [11]. На вход фильтра поступает выходной сигнал дискриминатора задержки $u_{\Delta\tau}(\Delta\tau)$, где $\Delta\tau = \tau - \hat{\tau}$, на выходе фильтра формируется оценка

задержки $\hat{\tau}$. Кроме порядка астатизма $m=2$ фильтр характеризуется коэффициентами усиления K_1 и K_2 . Коэффициент передачи разомкнутого фильтра определяется выражением

$$W^{(2)}(p) = \frac{K_1 p + K_2}{p^2}, \quad (9)$$

а коэффициент передачи замкнутого фильтра – выражением

$$K^{(2)}(p) = \frac{K_1 p + K_2}{p^2 + K_1 p + K_2}. \quad (10)$$

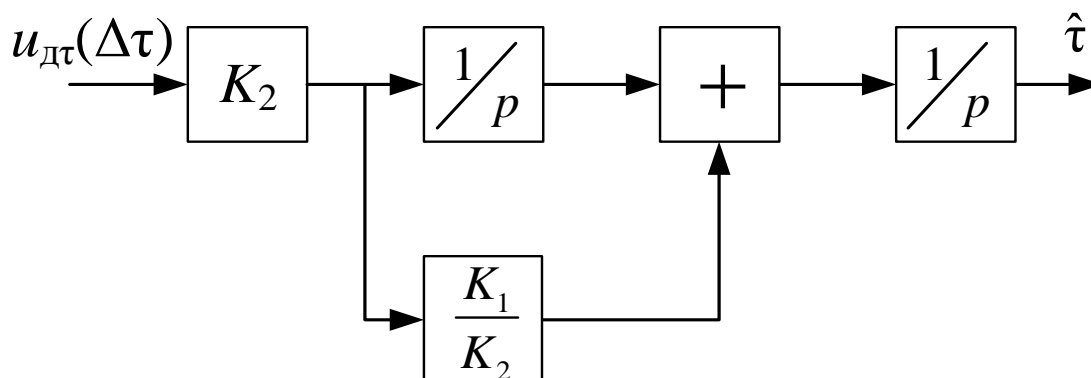


Рис. 5. Структурная схема фильтра с астатизмом второго порядка

Операторный коэффициент передачи замкнутого фильтра $K(p)$ при замене p на $i\omega$ дает частотную характеристику $K(i\omega)$, модулем которой в линейных системах фильтрации определяется шумовая полоса пропускания фильтра [6, 11]

$$\Delta f_{\text{ш}} = \frac{1}{2\pi K(0)} \int_0^{\infty} |K(i\omega)|^2 d\omega. \quad (11)$$

От шумовой полосы пропускания $\Delta f_{\text{ш}}$, определяемой выражением (7), зависит дисперсия шумовой ошибки слежения. В общем случае $\sigma_{\lambda}^2 = N_{0\lambda} \Delta f_{\text{ш}}$, где $N_{0\lambda}$ – спектральная плотность мощности эквивалентного шума на входе следящего измерителя (шума наблюдений) при слежении за параметром λ . Отметим, что спектральная плотность мощности эквивалентного шума $N_{0\lambda}$ зависит от отношения сигнал/шум на входе РЭС. Поэтому для уменьшения дисперсии шумовой ошибки слежения необходимо увеличивать энергетический потенциал РЭС и уменьшать шумовую полосу пропускания фильтра $\Delta f_{\text{ш}}$. При слежении за задержкой сигнала фильтром с астатизмом второго порядка с коэффициентом передачи $K^{(2)}(p)$, определяемым выражением (10), и оптимизированными параметрами шумовая полоса пропускания составляет $\Delta f_{\text{ш}}^{(2)} = 0,53\sqrt{K_2}$ [6], а динамическая ошибка будет определяться величиной не учтенных при линейной аппроксимации $\tau^*(t)$ функции $\tau(t)$ составляющих, имеющих порядок $n \geq 2$.

Структурная схема фильтра слежения за фазой с астатизмом $m=3$, включающего три интегратора ($1/p$), показана на рис. 6. Использовано представление структуры фильтра и его элементов в соответствии с работой [11]. На вход фильтра поступает выходной сигнал фазового дискриминатора $u_{\text{дф}}(\Delta\varphi)$, где $\Delta\varphi = \varphi - \hat{\varphi}$, на выходе фильтра формируется оценка фазы $\hat{\varphi}$. Кроме порядка астатизма $m=3$ фильтр характеризуется коэффициентами усиления K_1 , K_2 и K_3 . Коэффициент передачи разомкнутого фильтра определяется выражением

$$W^{(3)}(p) = \frac{K_1 p^2 + K_2 p + K_3}{p^3}, \quad (12)$$

а коэффициент передачи замкнутого фильтра – выражением

$$K^{(3)}(p) = \frac{K_1 p^2 + K_2 p + K_3}{p^3 + K_1 p^2 + K_2 p + K_3}. \quad (13)$$

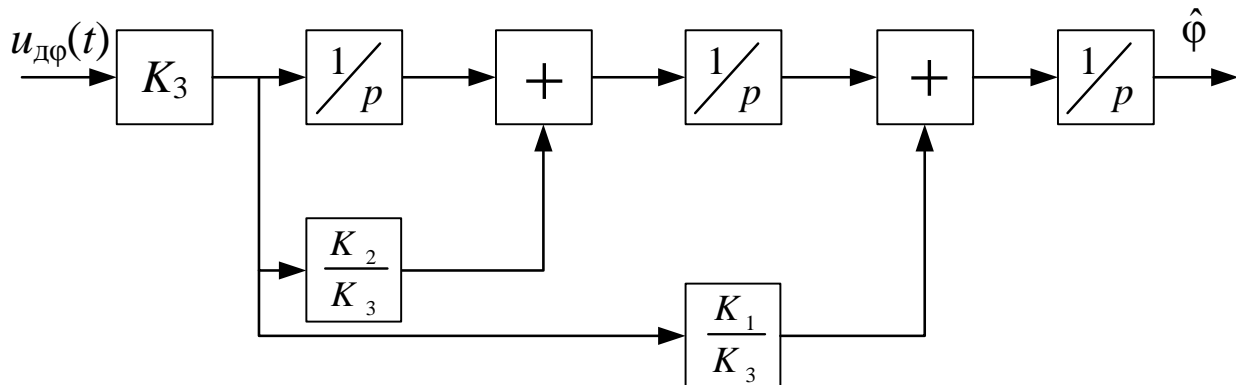


Рис. 6. Структурная схема фильтра с астатизмом третьего порядка

При слежении за фазой сигнала фильтром с астатизмом третьего порядка с коэффициентом передачи $K^{(3)}(p)$, определяемым выражением (13), и оптимизированными параметрами шумовая полоса пропускания составляет $\Delta f_{\text{ш}}^{(3)} = 0,833\sqrt[3]{K_3}$ [6], а динамическая ошибка будет определяться величиной составляющих, не учтенных при аппроксимации $\varphi^*(t)$ функции $\varphi(t)$ вида (10).

Фильтр слежения за фазой с $m=2$, проигрывая фильтру с $m=3$ в величине динамической (систематической) ошибки слежения $\delta\varphi$, имеет меньшую шумовую полосу пропускания $\Delta f_{\text{ш}}$, определяемую выражением (11), и, соответственно, меньшую дисперсию шумовой (случайной) ошибки слежения $\sigma_{\varphi}^2 = N_{03}\Delta f_{\text{ш}}$. Это следует из сравнения значений шумовой полосы пропускания $\Delta f_{\text{ш}}^{(2)} = 0,53\sqrt{K_2}$ и $\Delta f_{\text{ш}}^{(3)} = 0,833\sqrt[3]{K_3}$ фильтров с астатизмом второго и третьего порядка с оптимизированными параметрами. В принятой системе обозначений параметров фильтров коэффициент усиления K_2 фильтра с астатизмом второго порядка соответствует коэффициенту усиления K_3 фильтра с астатизмом третьего порядка. При $K_2=K_3=K$ в широком диапазоне значений K выполняется неравенство $\Delta f_{\text{ш}}^{(3)} > \Delta f_{\text{ш}}^{(2)}$, и фильтр с астатизмом третьего порядка проигрывает фильтру с астатизмом второго порядка в величине дисперсии шумовой (случайной) ошибки слежения σ_{φ}^2 .

Показатели точности слежения за фазой σ_{φ}^2 и $\delta\varphi$ могут быть объединены в единый показатель $(\sigma_{\varphi} + |\delta\varphi|)$ или $\sqrt{\sigma_{\varphi}^2 + \delta\varphi^2}$, и по такому показателю в одних условиях может быть более предпочтителен выбор следящей системы с астатизмом третьего порядка, а в других условиях – выбор следящей системы с астатизмом второго порядка. Так, на этапе начальной синхронизации точность систем фазовой автоподстройки с астатизмом третьего порядка хуже, чем у систем с астатизмом второго порядка, а после вхождения в синхронизм система с астатизмом третьего порядка имеет более высокую точность чем система с астатизмом второго порядка [8], при этом полоса удержания по скорости изменения частоты на 30–100% больше. Поэтому в рассматриваемой задаче в следящем измерителе фазы системы синхронизации

РЭС спутниковой радиолинии может быть использован фильтр с управляемой структурой, у которого в зависимости от условий приема сигналов и этапа вхождения в синхронизм включается либо второй, либо третий порядок астатизма. В терминах теории систем автоматического управления фильтр с управляемым порядком астатизма является системой с самонастраиваемой структурой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Качество работы приемных РЭС спутниковых радиолиний с шумоподобными фазоманипулированными сигналами в значительной степени зависит от точности работы системы синхронизации при слежении за задержкой и фазой принимаемых сигналов. Наибольшая динамика изменения параметров принимаемых сигналов имеет место при связи с низкоорбитальными КА. Для этого случая на основе общего подхода к определению порядка астатизма следящих измерителей параметров сигналов и анализа характера изменения параметров сигнала при прохождении КА в зоне радиовидимости наземной РЭС обоснованы требования к порядку астатизма следящих измерителей задержки и фазы. Показано, что в рассмотренных спутниковых радиолиниях необходимо использовать следящие измерители задержки с астатизмом второго порядка и следящие измерители фазы с управляемым астатизмом второго или третьего порядка.

Управление порядком астатизма следящего измерителя фазы осуществляется с учетом текущих условий приема сигналов, при этом в логику управления могут быть заложены требования к суммарной точности слежения за фазой и другим показателям, например к времени установления синхронизма. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании РЭС низкоорбитальных систем спутниковой связи и управления КА.

Список используемых источников

1. Галантерник Ю. М., Гориш А. В., Калинин А. Ф. Командно-измерительные системы и наземные комплексы управления космическими аппаратами. – М.: МГУЛ, 2003. – 200 с.
2. Ипатов В. П. Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов. Принципы и приложения / под ред. В. П. Ипатова. – М.: Техносфера, 2007. – 487 с.
3. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение: пер. с англ. – М.: Вильямс, 2017. – 1104 с.
4. Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.
5. Мальцев Г. Н., Евтеев А. В. Устойчивость слежения за задержкой фазоманипулированных сигналов с расширением спектра в системах синхронизации радиотехнических систем // Информатика и автоматика. – 2021. – Т. 20, № 1. – С. 16–43.
6. Перов А. И., Харисов В. Н. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. – М.: Радиотехника, 2010. – 800 с.
7. Цифровые системы фазовой синхронизации / М. И. Жодзишский [и др.]; под ред. М. И. Жодзишского. – М.: Сов. радио, 1980. – 208 с.
8. Жодзишский М. И. Анализ цифровых систем ФАП для фильтрации гармонического сигнала. – М.: Радиотехника и электроника, 1973. – 979 с.
9. Теоритические основы радиолокации: учеб. пособие для вузов / А. А. Коростелев [и др.]; под ред. В. Е. Дулевича. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Сов. радио, 1978. – 608 с.
10. Михайлов Н. В. Чистяков В. В. Приемники спутниковой навигации космического базирования: архитектура и первичная обработка: моногр. – Воронеж: Научная книга, 2014. – 124 с.

11. *Перов А. И.* Статистическая теория радиотехнических систем: учеб. пособие для вузов. – М.: Радиотехника, 2003. – 400 с.
12. *Иванов Н. М., Лысенко Л. Н.* Баллистика и навигация космических аппаратов. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Дрофа, 2004. – 544 с.
13. *Галантерник Ю. М., Гориши А. В., Калинин А. Ф.* Командно-измерительные системы и наземные комплексы управления космическими аппаратами. – М.: МГУЛ, 2003. – 200 с.
14. *Фомин А. И.* Синхронизация цифровых радиосистем передачи информации. – М.: Сайнс-Пресс, 2008. – 80 с.
15. *Слесарев А. С.* Оптимизация передаточной функции петлевого фильтра контура ФАПЧ с астатизмом второго порядка систем синхронизации спутниковых командно-программных радиолиний // Вестник РГРТУ. – Рязань: ЦНИТ РГРТУ, 2007. – Вып. 22. – С. 115–118.

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

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОРРЕЛИРОВАННОСТИ ПОМЕХ НА СТЕПЕНЬ ИХ ПОДАВЛЕНИЯ В АДАПТИВНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКЕ ХОУЭЛЛСА – ЭППЛБАУМА

В статье приведены результаты вычислительного эксперимента по исследованию степени влияния корреляционной зависимости между сигналом и помехой на характеристики оптимальной пространственной селекции в линейной эквидистантной антенной решетке с адаптивным компенсатором помех по схеме Хоуэллса – Эпплбаума. Показаны существенные отличия формы диаграммы направленности, диаграммы уровней и показателей эффективности адаптивной антенной решетки по сравнению со стандартной в зависимости от направления прихода помех и величины корреляционной связи между сигналом и помехой. Проанализирован характер изменения отношения сигнал/помеха на выходе адаптивной антенной решетки в зависимости от значения коэффициента корреляции сигнала и помехи, от направления прихода помех и параметров сигнально-помеховой обстановки. Произведена оценка граничного значения коэффициента корреляции, вызывающего недопустимое снижение эффективности пространственной селекции помехи.

Ключевые слова: адаптивная антенная решетка, антенная решетка с адаптивным компенсатором помех, коррелированные помехи, алгоритм Хоуэллса – Эпплбаума.

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы совершенствования алгоритмов функционирования адаптивных антенных решеток (ААР) не утрачивают своей актуальности и продолжают оставаться предметом интенсивных исследований, направленных на решение классической задачи радиотехники – повышения помехоустойчивости радиотехнических систем связи, локации и навигации за счет оптимальной пространственной селекции принимаемых сигналов [1, 2].

Основное преимущество ААР заключается в способности без априорной информации о помеховой ситуации автоматически обнаруживать присутствие сигналов источников помех и подавлять их, повышая качество выделения и обработки полезной информации. Алгоритмы адаптации антенных решеток (АР) в первую очередь различаются принятыми критериями оптимальности, при формировании которых используют отличия сигнала от помех как необходимую априорную информацию. При этом эффект применения ААР будет существенно выше, чем обычных АР или антенн с узкой диаграммой направленности (ДН) [9, 10].

Уже давно успешно ведутся работы по поиску, в дополнение к адаптивным методам подавления помех, методов по созданию зоны защиты сигнала в ДН АР. К ним в первую очередь следует отнести компенсационные методы в ААР, показанные в работе [3–7]. Однако в этих устройствах вместе с помехами подавляются и полезные сигналы, что приводит к частичной утрате принимаемой информации [7].

Свойства АР с компенсатором помех по схеме Хоуэллса – Эпплбаума рассмотрены в ряде работ [1, 6, 8], но при отсутствии коррелированности сигнала и помех. В научно-технической литературе недостаточно полно раскрыто влияние коэффициента корреляции с сигналом помех на величину их подавления в ААР компенсационного типа, на ее селективные свойства и уровень соотношения сигнал/помеха на выходе АР.

Целью работы являются анализ и оценка влияния коррелированных с сигналом помех на селективные свойства адаптивной антенной решетки компенсационного типа с зоной защиты

полезного сигнала по главному лучу ДН и определение граничных значений коэффициента корреляции, приводящих к неприемлемому падению эффективности.

В статье представлены результаты вычислительного эксперимента по оценке пространственно-селективных характеристик АР с адаптивной компенсацией помех по алгоритму Хоуэллса – Эпплбаума при воздействии коррелированных с сигналом помех и изменении параметров сигнально-помеховой обстановки. Проанализированы кривые отношения сигнал/помеха на выходе ААР в зависимости от направления прихода помех и коэффициента корреляции сигнала с помехой.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим устройство пространственной селекции (УПС) в схеме Хоуэллса – Эпплбаума [1, 5, 6].

Более подробное описание структурной схемы и принципа действия УПС данного типа было представлено авторами в работе [8]. В настоящей статье воспользуемся полученным математическим аппаратом и проанализируем случай воздействия на вход УПС коррелированных с сигналом помех, которое приводит к уменьшению различий между ними, к сложности адаптации и ухудшению показателей эффективности ААР.

УПС содержит основной (нерегулируемый) и компенсационный (регулируемый) каналы обработки сигналов [8]. За счет выбора оптимального вектора весовых коэффициентов (ВВК) АР в адаптивном компенсационном канале появляется возможность управления формой характеристики ДН с целью ослабления воздействия помех вплоть до полного их подавления даже в условиях априорной неопределенности сигнально-помеховой обстановки.

Примем, что АР устройства пространственной селекции является линейной, эквидистантной и состоит из L приемных элементов. Вектор выходного напряжения АР \mathbf{x} представляет собой векторную сумму сигнала \mathbf{x}_c , помех \mathbf{x}_{ni} и собственных шумов $\mathbf{x}_ш$:

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

где N – число воздействующих помех.

При математических расчетах удобнее применить отношения уровней сигнала q_c , помех q_{ni} и шума $q_ш$ к уровню шума:

$$q_c = P_c/P_ш, \quad q_{ni} = P_{ni}/P_ш \quad (i = 1, 2, 3), \quad q_ш = P_ш/P_ш = 1,$$

где P_c , P_{ni} , $P_ш$ – соответственно мощности сигнала, помех и шума на выходе одного элемента АР.

Тогда векторно сигнал, помехи и шум на выходе АР приведем к виду:

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

где \mathbf{h}_c , \mathbf{h}_{ni} – фазоры, учитывающие направления прихода сигнала и помех;

$\mathbf{X}_ш$ – комплексный вектор амплитуд шумов элементов АР.

Если примем, что шумы элементов АР независимые и белые, с сигналом и помехами не коррелированы, имеют равную мощность $P_ш$, то вектор шума $\mathbf{x}_ш$ (2) можно описать выражением

$$\mathbf{x}_ш = \sqrt{q_ш} \mathbf{X}_ш = \mathbf{1} = (1 \ 1 \ \dots \ 1)^T. \quad (3)$$

Для линейной эквидистантной АР фазоры сигнала \mathbf{h}_c и помех \mathbf{h}_{ni} имеют вид [6–8]:

$$\mathbf{h}_c = [1, e^{-j\varphi_c}, \dots, e^{-j(L-1)\varphi_c}]^T; \quad \mathbf{h}_{ni} = [1, e^{-j\varphi_{ni}}, \dots, e^{-j(L-1)\varphi_{ni}}]^T \quad (4)$$

где φ_c и φ_{ni} – фазовые сдвиги сигнала и помех в ряду стоящих элементах АР, которые определяются соотношениями: $\varphi_c = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta_c$ и $\varphi_{ni} = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta_{ni}$;

d – расстояние между ближайшими элементами АР;

- λ – длина волны;
 $\theta_c, \theta_{\text{ш}}$ – углы прихода сигнала и помех от перпендикуляра к линии размещения приемных элементов АР;
 $(\dots)^T$ – знак транспонирования.

Выходной сигнал y_0 основного канала УПС формируется в диаграммообразующей схеме в соответствии с равенством

$$y_0 = \mathbf{w}^H \mathbf{x} = \mathbf{x}^H \mathbf{w},$$

где \mathbf{w} – вектор весовых коэффициентов (ВВК), который формирует диаграмму направленности и управляющий сканированием луча АР в направлении прихода сигнала, $\mathbf{w} = (w_1, w_2, \dots, w_L)^T$;

$(\dots)^H$ – операция эрмитова сопряжения.

Если угол поступления сигнала $\theta_c = 0$, то направлением защиты главного лепестка ДН УПС будет перпендикуляр к линии размещения антенных элементов, ВВК \mathbf{w} и фазор сигнала \mathbf{h}_c представляют собой единичные векторы $\mathbf{w} = \mathbf{h}_c = \mathbf{1} = (1, 1, \dots, 1)^T$, а напряжение выходного сигнала y_0 основного канала УПС

$$y_0 = \mathbf{x}^H \mathbf{w} = \mathbf{x}^H \mathbf{1}. \quad (5)$$

Для обеспечения пространственной селекции помех из y_0 вычитается сигнал y_k с выхода компенсационного канала [8]:

$$z = y_0 - y_k.$$

В оптимальном режиме все сигналы на компенсационных выходах должны быть декоррелированы с выходным сигналом y_0 основного канала. Эту операцию выполняет пространственный многоканальный фильтр блока предварительной фильтрации (БПФ) компенсационного канала, на вход которого поступает сигнал \mathbf{x} с выхода элементов АР.

Основные селективные свойства, эффективность и количество подавляемых помех в синтезируемом УПС определяет матрица-оператор \mathbf{A} в БПФ, где осуществляется поэлементное вычитание сигналов. Матрица \mathbf{A} имеет вид [7, 8]

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 1 & -1 \end{bmatrix}_{(L-1) \times L} \quad (6)$$

За счет диагонального вида матрицы преобразования \mathbf{A} (6) и наличия отрицательных единиц в главной диагонали, на выходе адаптивного компенсационного канала принимаемый сигнал равен нулю, что обеспечивает подавление помех без подавления сигнала [3, 9].

На выходе блока пространственной фильтрации БПФ [8] формируется напряжение

$$\mathbf{u} = \mathbf{A} \mathbf{x} \quad (7)$$

размерности $(L - 1)$, так как матрица преобразования \mathbf{A} (6) не квадратная, количество каналов на выходе фильтра уменьшается на единицу.

Однако указанный вид матрицы преобразования \mathbf{A} (6) формирует разностную ДН антенны компенсационного канала с «острым» нулем, что приводит к подавлению в области главного луча наряду с помехами и полезных сигналов, т. е. к искажению или потере полезной информации [7]. При этом зона защиты формируется в очень узком секторе углов (красная кривая на рис. 1). УПС имеет высокую чувствительность к ошибкам сопровождения по углам, требует прецизионной юстировки АР, что является существенным препятствием для практической аппаратной реализации метода.

Перспективные методы увеличения сектора защиты в главном луче ААР связаны с выбором вида оператора \mathbf{A} , который определяет структуру блока предварительной фильтрации и алгоритм вычисления оптимального адаптивного ВВК компенсационного канала УПС. Со-

гласно рекомендациям, содержащимся в патенте [7] и статье [8], для расширения сектора защиты сигнала в главном луче ДН используем произведение двух матриц преобразования вида \mathbf{A} (6)

$$\mathbf{A}_{\text{дв}} (L-2) \times L = \mathbf{A}_{(L-2) \times (L-1)} \mathbf{A}_{(L-1) \times L} = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -2 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -2 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & -2 & 1 \end{bmatrix}_{(L-2) \times L}, \quad (8)$$

которое обеспечивает существенное расширение диаграммы уровней на выходе УПС.

В предлагаемом устройстве пространственной селекции с адаптивным компенсатором помех по схеме Хоуэллса – Эпплбаума ширина зоны защиты сигнала определяется не шириной ДН АР основного канала, а существенно более узкой шириной диаграммы уровней (ДУ) выходного сигнала УПС [8], которая и определяет уровень помехоустойчивости системы.

На рис. 1 изображены графики сравнения ширины ДН АР основного канала с шириной диаграммы уровней УПС без расширения и с расширением. При этом ширина ДУ без расширения (красная кривая) на уровне 0.5 для АР из восьми элементов составляет $\pm 1^\circ$ и в 10 раз уже, чем ДН АР основного канала. Однако при увеличении размеров АР эта ДУ становится нереализуемой, так как требует очень высокой точности юстировки и наведения антенны. Ширина диаграммы уровней расширенного УПС (желтая кривая), как видно из сравнения кривых на уровне 0.5, увеличилась почти в 2 раза и составляет 30% от ширины ДН основного канала УПС, подлежащего защите от помех.

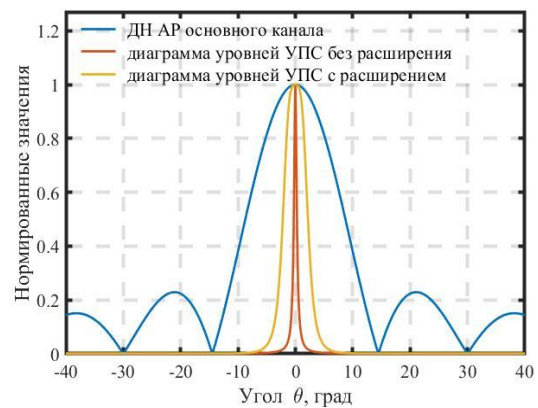


Рис. 1. ДН АР основного канала, ДУ УПС без расширения и с расширением

Таким образом, рабочая ширина ДН УПС с расширением уменьшилась приблизительно в 3,33 раза без увеличения размера антенны за счет использования адаптивного компенсатора помех по схеме Хоуэллса – Эпплбаума. Такая ширина ДУ уже позволяет осуществить практическую реализацию УПС в радиолокационных системах, системах пеленгации и передачи информации.

Результаты вычислительного эксперимента показывают, что трехкратное использование матрицы преобразования \mathbf{A} вида (6) нецелесообразно, так как ведет к расширению ДУ сигнала на выходе УПС до ширины ДН АР основного канала и существенно ухудшает помехоустойчивость предлагаемого устройства пространственной селекции.

Компенсационный сигнал УПС является адаптивным и формируется на основании алгоритма взвешенного суммирования выходного напряжения \mathbf{u} (7) с учетом значений адаптивных весовых коэффициентов $\mathbf{w}_u = (w_{u1}, w_{u2}, \dots, w_{uL-1})^T$ компенсационного канала

$$y_k = \mathbf{w}_u^H \mathbf{u} = \mathbf{u}^H \mathbf{w}_u. \quad (9)$$

В итоге при угле наблюдения полезного сигнала $\theta_c = 0$ сигнал z на выходе УПС составит

$$z = y_0 - y_k = \mathbf{x}^H \mathbf{w} - \mathbf{u}^H \mathbf{w}_u = \mathbf{x}^H \mathbf{1} - \mathbf{u}^H \mathbf{w}_u, \quad (10)$$

где \mathbf{w} — вектор-столбец нерегулируемых значений весовых коэффициентов диаграммообразующей схемы основного канала, $\mathbf{w} = (w_1, w_2, \dots, w_L)^T$;

\mathbf{w}_u — вектор-столбец значений адаптивных весовых коэффициентов компенсационного канала, $\mathbf{w}_u = (w_{u1}, w_{u2}, \dots, w_{uL-1})^T$.

Таким образом, адаптивные свойства АР обеспечивает оптимизация ВВК \mathbf{w}_u с целью достижения требуемого качества приема. Для конкретной сигнально-помеховой обстановки в

адаптивном процессоре, выполненном по схеме Хоуэллса – Эпплбаума, рассчитываются оптимальные значения ВВК, т. е. $\mathbf{w}_u = \mathbf{w}_{u \text{ opt}}$, дающие наивысшее качество выделения полезного сигнала и максимально достижимое подавление помех.

Диаграмма направленности компенсационного канала является разностной, на его выходе сигнала нет, подавление помехи в компенсаторе производится без ослабления сигнала [1, 7, 8]. Следовательно, при выборе критерия оптимальности можно ограничиться только анализом уровня помехи, так как мощность полезного сигнала остаётся постоянной при изменении значений адаптивного ВВК \mathbf{w}_u компенсационного канала. Именно поэтому в рассматриваемой УПС в качестве критерия оптимальности принят критерий минимума средней мощности P_z выходного сигнала z (10) УПС

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

позволяющий осуществлять адаптацию значений ВВК \mathbf{w}_u компенсационного канала к виду сигнально-помеховой обстановки на данный момент.

На основании данного критерия оптимальный ВВК $\mathbf{w}_{u \text{ opt}}$ компенсационного канала, соответствующий минимуму средней мощности выходного сигнала УПС, приобретает вид [8]

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

где \mathbf{R}_u – корреляционная матрица вектора напряжения \mathbf{u} (6) на выходе пространственного фильтра компенсационного канала, $\mathbf{R}_u = \mathbf{A} \mathbf{R}_x \mathbf{A}^T$;

$(\dots)^{-1}$ – знак обращения матрицы.

За счет оптимального выбора комплексного ВВК $\mathbf{w}_{u \text{ opt}}$ (12) в компенсационном канале адаптивной антенной решетки данного типа осуществляется изменение формы ДН УПС с целью улучшения качества приема полезного сигнала и одновременного подавления помех.

Используя уравнение выходного сигнала z (10) и значение напряжения \mathbf{u} (7) на выходе БПФ

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

получаем следующее выражение для обобщенного вектора весовых коэффициентов УПС:

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

Необходимая информация для вычисления оптимального значения ВВК $\mathbf{w}_{u \text{ opt}}$ (12) компенсационного канала и формирования обобщенного вектора весовых коэффициентов $\mathbf{w}_{\text{УПС}}$ (14) УПС содержится в автокорреляционной матрице \mathbf{R}_x вектора сигнала \mathbf{x} (2) на выходах элементов АР, которая с учетом принятых допущений в случае коррелированных сигнала и помех находится по формуле

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_x = \langle \mathbf{x} \mathbf{x}^H \rangle &= q_c \mathbf{h}_c \mathbf{h}_c^H + \sum_{i=1}^N q_{\text{п}i} \mathbf{h}_{\text{п}i} \mathbf{h}_{\text{п}i}^H + \sum_{i=1}^N r_{c \text{ п}i} \sqrt{q_c q_{\text{п}i}} \mathbf{h}_c \mathbf{h}_{\text{п}i}^H + \sum_{i=1}^N r_{\text{п}i c} \sqrt{q_{\text{п}i} q_c} \mathbf{h}_{\text{п}i} \mathbf{h}_c^H + \mathbf{I} = \\ &= \mathbf{R}_c + \mathbf{R}_{\text{нкп}} + \mathbf{R}_{\text{ксп}} = \mathbf{R}_c + \mathbf{M}, \end{aligned} \quad (15)$$

где $\langle \dots \rangle$ – операция статистического усреднения;
 \mathbf{R}_c – ковариационная матрица полезного сигнала, $\mathbf{R}_c = q_c \mathbf{h}_c \mathbf{h}_c^H$;
 $r_{c \text{ п}i}$ – численные значения коэффициентов корреляции сигнала с каждой из i помех, $r_{c \text{ п}i} = r_{\text{п}i c}$;
 \mathbf{I} – единичная диагональная матрица, обозначающая уровень шумов элементов АР;
 \mathbf{M} – корреляционная матрица суммы помех и шумов.

Согласно формуле (15) матрица \mathbf{M} составляет

$$\mathbf{M} = \mathbf{R}_{\text{нкп}} + \mathbf{R}_{\text{ксп}} \quad (16)$$

и содержит две составляющие:

– ковариационную матрицу некоррелированных шума и помех:

$$\mathbf{R}_{\text{нкп}} = \sum_{i=1}^N q_{\text{п}i} \mathbf{h}_{\text{п}i} \mathbf{h}_{\text{п}i}^H + \sqrt{q_{\text{ш}}} \mathbf{S}_{\text{ш}} = \sum_{i=1}^N q_{\text{п}i} \mathbf{h}_{\text{п}i} \mathbf{h}_{\text{п}i}^H + \mathbf{I}; \quad (17)$$

– матрицу корреляционной составляющей помехи

$$\mathbf{R}_{\text{ксп}} = \sum_{i=1}^N r_{\text{с п}i} \sqrt{q_{\text{с}} q_{\text{п}i}} \mathbf{h}_{\text{с}} \mathbf{h}_{\text{п}i}^H + \sum_{i=1}^N r_{\text{п}i \text{ с}} \sqrt{q_{\text{п}i} q_{\text{с}}} \mathbf{h}_{\text{с}} \mathbf{h}_{\text{п}i}^H. \quad (18)$$

Важно отметить, что при наличии корреляции сигнала и помех появляется корреляционная составляющая помехи $\mathbf{R}_{\text{ксп}}$ (18), существенно увеличивающая суммарную мощность помех прямо пропорционально значениям коэффициентов взаимной корреляции $r_{\text{с п}i}$. Поэтому теоретический и практический интерес представляет исследование ее влияния на форму ДН и показатели эффективности ААР с адаптивным компенсатором по схеме Хоуэллса – Эпплбаума.

Помех может быть несколько, вклад каждой из них в увеличение мощности помехового сигнала становится очевидным при рассмотрении формул (15)–(18). В статье для наглядности полученных результатов и доступности изложения ограничимся приходящими с различных направлений тремя помехами, считая с некоторой долей упрощения, что с сигналом коррелирована только вторая помеха, т. е. $r_{\text{с п}1} = r_{\text{п}1 \text{ с}} = r_{\text{с п}3} = r_{\text{п}3 \text{ с}} = 0, r_{\text{с п}2} = r_{\text{п}2 \text{ с}} = \text{var}$.

С учетом данных предположений полная матрица помех \mathbf{M} (16) при моделировании изменяет свое значение в зависимости от наличия корреляции между сигналом и второй помехой:

– при отсутствии корреляции между сигналом и помехами матрица $\mathbf{R}_{\text{ксп}} = \mathbf{0}$ и полная ковариационная матрица помех составит

$$\mathbf{M} = \mathbf{R}_{\text{нкп}} = q_{\text{п}1} \mathbf{h}_{\text{п}1} \mathbf{h}_{\text{п}1}^H + q_{\text{п}2} \mathbf{h}_{\text{п}2} \mathbf{h}_{\text{п}2}^H + q_{\text{п}3} \mathbf{h}_{\text{п}3} \mathbf{h}_{\text{п}3}^H + \mathbf{I}; \quad (19)$$

– при наличии корреляции между сигналом и второй помехой матрица $\mathbf{R}_{\text{ксп}} \neq \mathbf{0}$ и сигнално-помеховая обстановка существенно ухудшается, т. е.

$$\mathbf{M} = \mathbf{R}_{\text{нкп}} + \mathbf{R}_{\text{ксп}} = q_{\text{п}1} \mathbf{h}_{\text{п}1} \mathbf{h}_{\text{п}1}^H + q_{\text{п}2} \mathbf{h}_{\text{п}2} \mathbf{h}_{\text{п}2}^H + q_{\text{п}3} \mathbf{h}_{\text{п}3} \mathbf{h}_{\text{п}3}^H + r_{\text{с п}2} \sqrt{q_{\text{с}} q_{\text{п}2}} (\mathbf{h}_{\text{с}} \mathbf{h}_{\text{п}2}^H + \mathbf{h}_{\text{п}2} \mathbf{h}_{\text{с}}^H) + \mathbf{I}. \quad (20)$$

В результате суммарная мощность коррелированных с сигналом помех (20) оказывается большей, чем сумма мощностей некоррелированных помех (19) и существенно зависит от значения коэффициентов взаимной корреляции $r_{\text{с п}2}$ [5, 6].

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Условия проведения эксперимента. Выбрана линейная эквидистантная АР из восьми элементов ($L=8$), дистанция между ближайшими элементами составляет $d = \lambda/2$, на вход АР одновременно поступает сигнал и две или три помехи. Полезный сигнал $\mathbf{x}_{\text{с}}$ приходит с направления $\theta_{\text{с}} = 0$, имеет относительную мощность $q_{\text{с вх}} = 50$, что по уровню в несколько раз меньше уровня помех $q_{1 \text{ вх}} = q_{2 \text{ вх}} = 250; q_{3 \text{ вх}} = 200$. Для сравнения выбраны два случая, показанные на рис. 2: а) направления прихода обеих помех $\theta_{\text{п}1} = -20^\circ$ и $\theta_{\text{п}2} = 20^\circ$ соответствуют максимумам боковых лепестков ДН основного канала; б) 2-я помеха при $\theta_{\text{п}2} = -7^\circ$ расположена в области главного лепестка, а 1-я помеха с $\theta_{\text{п}1} = 20^\circ$ – в максимуме первого бокового лепестка ДН. С сигналом коррелирована только вторая помеха. При моделировании изменялись углы прихода помех и значение коэффициента взаимной корреляции сигнала и помехи $r_{\text{с п}2}$ в диапазоне $[0, 1]$.

Условие независимости сигнала и помех является частным случаем варианта взаимной корреляции сигнала и второй помехи с корреляционным коэффициентом $r = r_{\text{с п}2} = 0$. Этот вариант на рисунках изображен отдельной кривой, характеризующей начальный уровень параметров УПС в отсутствие коррелированности сигнала и помех, что позволяет наглядно

оценить динамику изменения основных характеристик УПС в зависимости от величины взаимной корреляции.

Вид диаграммы направленности УПС. В соответствии с формулой (14) нормированная обобщенная диаграмма направленности (ДН) УПС описывается равенством

$$S_{\text{Вых}} = \mathbf{h}_C^H \mathbf{w}_{\text{УПС}} / L. \quad (21)$$

Вид диаграммы направленности УПС (21) и места формирования глубоких минимумов в направлении помех определяются обобщенными значениями ВВК $\mathbf{w}_{\text{УПС}}$ (14), которые адаптивно изменяются в соответствии с текущим состоянием сигнально-помеховой обстановки.

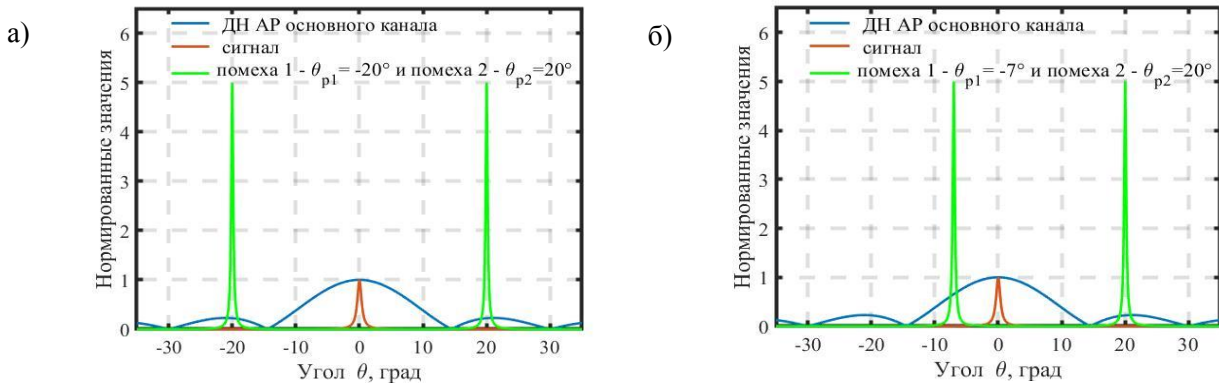


Рис 2. Сигнально-помеховая обстановка:

а – помехи в боковых лепестках ДН; *б* – 1-я помеха в боковом лепестке, 2-я помеха в главном лепестке ДН основного канала

Проанализируем характер изменения вида ДН УПС при наличии взаимной корреляции сигнала и помехи в условиях сигнально-помеховой обстановки, показанной на рис. 2, *а*. На рис. 3 представлены графики зависимостей нормированных ДН в декартовой и логарифмической системах координат от значения коэффициента корреляции r между сигналом и 2-й помехой. В направлениях помех $\theta_{p1} = -20^\circ$ и $\theta_{p2} = 20^\circ$ формируются «нули» ДН, глубина которых зависит от коэффициента корреляции r . При отсутствии корреляции ($r=0$) степень подавления помех максимальная и значение затухания ДН УПС в направлении помех равно минус 79 Дб.

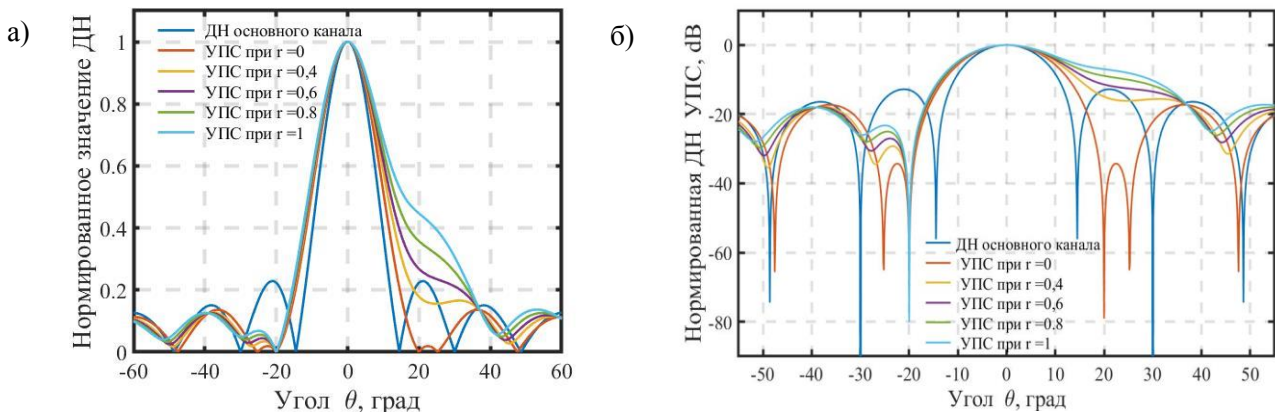


Рис. 3. Зависимость нормированного значения множителя антенной решетки от величины коэффициента корреляции r между сигналом и 2-й помехой:
а – в декартовых координатах, *б* – в логарифмическом масштабе

Согласно графикам на рис. 3,б с ростом коэффициента корреляции r формирование «нуля» ДН в направлении на коррелированную с сигналом помеху $\theta_{п2} = 20^0$ прекращается и степень подавления 2-й коррелированной помехи резко падает. При этом глубина «нуля» ДН в направлении некоррелированной 1-й помехи $\theta_{п1} = -20^0$ постоянна и не зависит от коэффициента r .

В адаптивной антенной решетке подавление помех происходит вследствие создания глубоких провалов в ДН УПС (21) в направлении помех [2, 4]. Построение графиков на рис. 4 имеет целью сравнить глубину нулей ДН в сторону прихода помех, расположенных в области главного и боковых лепестков, а также выявить их связь с величиной коэффициента корреляции с сигналом. В направлении коррелированных помех глубина «нулей» меньше, чем некоррелированных. Так, при попадании помех в боковые лепестки глубина «нуля» составляет -79 дВ для некоррелированных и 56 дВ для коррелированных помех (фиолетовая и красная кривые), а при попадании помехи в главный лепесток ДН АР основного канала – соответственно 62 дВ и -46 дВ (желтая и синяя кривые). При этом алгоритм формирования нулей не зависит от того, находится ли помеха в области основного или бокового лепестка.

В отличие от коррелированной помехи, уровень подавления некоррелированной с сигналом помехи постоянен, не зависит от коэффициента корреляции r в обоих случаях. Анализируя красный и синий графики на рис. 4, становится понятно, что рассматриваемый метод пространственной селекции с адаптивным компенсатором помех по схеме Хоуэллса – Эпплбаума очень критичен к наличию взаимной корреляции сигнала и помехи.

Наиболее резкие изменения степени подавления помех происходят при $r = [0 - 0.3]$, когда глубина нулей уменьшается от минус 80 в боковом лепестке и от минус 54 дБ до минус 20 дБ в главном лепестке, а затем при $r = [0.3 - 1]$ растет до минус 7-8 дБ.

Результаты моделирования зависимости значения обобщенной ДН УПС от величины коэффициента корреляции r между сигналом и 2-й помехой выявили интересную особенность и привели к неожиданному выводу. При мощности коррелированной помехи, сопоставимой с уровнем полезного сигнала, например при значениях $q_c=50$, $q_{п1} = 50$, $q_{п2} = 25$, влияние взаимной корреляции сигнала и помехи значительно возрастает (рис. 5). На месте помехи нуль исчезает, форма ДН искажается более существенно (желтая и фиолетовая кривые). И уже при значениях $r = 0,8$ и $1,0$ нормированное значение ДН равно 1,2 и 1,4 соответственно, превышает максимальное нормированное значение единица для направления прихода сигнала и начинает усиливать помеху.

Приведенный для наглядности на рис. 5,б график ДН УПС в полярной системе координат дополнительно подчеркивает расширение ДН в направлении коррелированной помехи, что соответствует ухудшению помехоустойчивости адаптивной АР по методу компенсации. Диаграмма направленности при корреляционной зависимости искажается, главный лепесток расширяется, увеличивается по амплитуде и отклоняется в сторону помехи.

Зависимость показателей эффективности ААР компенсационного типа от степени коррелированности сигнала и 2-й помехи. В статье в качестве показателя результирующей эффективности пространственной селекции полезного сигнала адаптивной АР компенсационного типа выбрано отношение сигнал/(помеха + шум)

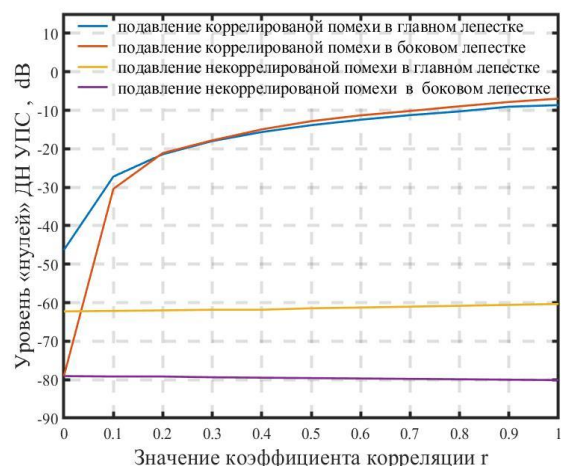


Рис. 4. Зависимость уровня «нулей» ДН УПС от коэффициента корреляции r между сигналом и 2-й помехой

$$\mu_{\text{ВЫХ}} = \frac{P_{C \text{ ВЫХ}}}{P_{(\text{П}+\text{Ш})\text{ВЫХ}}} = \frac{\mathbf{w}_{\text{УПС}}^H \mathbf{R}_C \mathbf{w}_{\text{УПС}}}{\mathbf{w}_{\text{УПС}}^H \mathbf{M} \mathbf{w}_{\text{УПС}}}, \quad (22)$$

где $P_{C \text{ ВЫХ}}$ – мощность полезного сигнала на выходе УПС, $P_{C \text{ ВЫХ}} = \mathbf{w}_{\text{УПС}}^H \mathbf{R}_C \mathbf{w}_{\text{УПС}}$;
 $P_{\text{П}+\text{Ш}}$ – суммарная мощность помех и шумов на выходе УПС, $P_{\text{П}+\text{Ш}} = \mathbf{w}_{\text{УПС}}^H \mathbf{M} \mathbf{w}_{\text{УПС}}$.

Результаты вычислительного моделирования получены в условиях показанной на рис. 2, а, б сигнально-помеховой обстановки, направления прихода 1-й и 2-й помех мощностью $q_{\text{П1}} = q_{\text{П2}} = 250$ фиксированы, третья помеха с относительной мощностью $q_{\text{П3}} = 200$ сканирует в пределах верхней полусферы $\theta_{\text{П3}} = [-90^\circ, 90^\circ]$. Дополнительно рассмотрен случай, когда коррелированной является не стационарная 2-я помеха, а скользящая 3-я помеха. Параметры АР УПС будут следующими: $L = 8$, $d = 5$ см, $\lambda = 10$ см. При указанных условиях отношение $C/(\text{П}+\text{Ш})$ $\mu_{\text{ВХ}}$ на входе основного канала УПС составляет

$$\mu_{\text{ВХ}} = \frac{P_{C \text{ ВХ}}}{P_{(\text{П}+\text{Ш})\text{ВХ}}} = \frac{q_c}{q_{\text{П1}} + q_{\text{П2}} + q_{\text{П3}} + q_{\text{Ш}}} = 0.071.$$

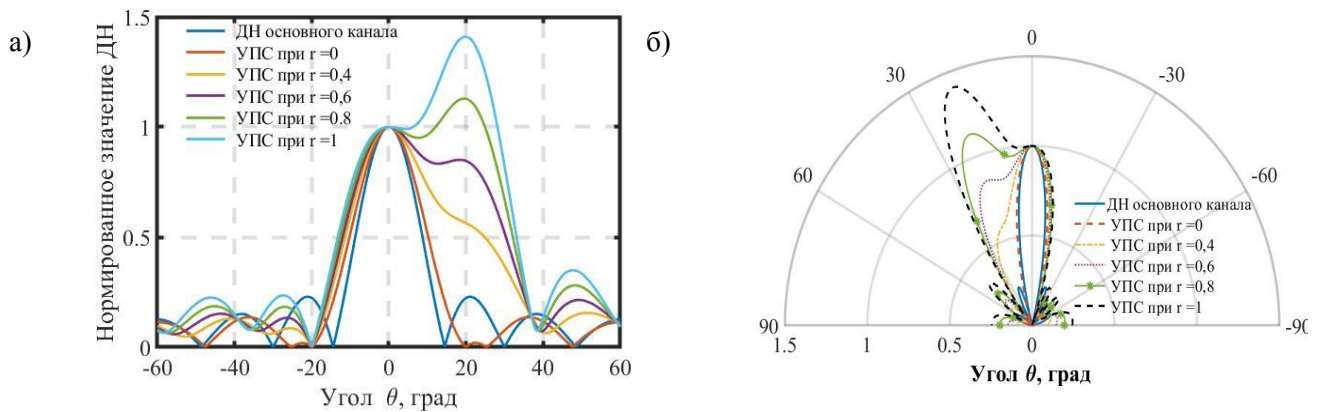


Рис. 5. Зависимость значения множителя АР от величины коэффициента корреляции r между сигналом и 2-й помехой при $q_c=50$, $q_{\text{П1}} = 50$, $q_{\text{П2}} = 25$:
 а – в декартовых координатах; б – в полярной системе координат

Графики на рис. 6, а и б иллюстрируют низкую помехоустойчивость стандартной антенной решетки при воздействии коррелированных с сигналом помех в условиях сигнально-помеховой обстановки (рис. 2, а и б) и подтверждают необходимость применения адаптивных методов пространственной селекции. На графиках показаны изменения отношения $C/(\text{П}+\text{Ш})$ на выходе стандартной АР при сканировании 3-й некоррелированной помехи в диапазоне углов $\theta_{\text{П3}} = [-90^\circ, 90^\circ]$ для различных значений коэффициента корреляции r между сигналом и второй помехой. Из графиков на рис. 6, а видно, что при воздействии стационарных помех в область боковых лепестков ДН основного канала УПС до значений коэффициента корреляции $r < 0,5$ сигнал превышает уровень помехи. При $r > 0,56$ селективные свойства стандартной АР ухудшаются, и она не выделяет сигнал из шума, так как отношение $C/(\text{П}+\text{Ш})$ принимает значение, меньшее единицы.

При воздействии 2-й помехи в область основного лепестка (рис. 2, б) при $\theta_{\text{П2}} = -7^\circ$ наблюдается резкое уменьшение отношения $C/(\text{П}+\text{Ш})$ на выходе стандартной АР (рис. 6, б) даже при отсутствии корреляции ($r = 0$), что показывает низкую помехоустойчивость стандартной АР к коррелированным и некоррелированным помехам при воздействии в область основного лепестка ДН. При всех значениях коэффициента корреляции r даже в области боковых лепестков на графиках рис. 6, б отношение $C/(\text{П}+\text{Ш})$ меньше 0,42, т. е. сигнал по уровню ниже помехи. Наиболее глубокое падение отношение $C/(\text{П}+\text{Ш})$ наблюдается при прохождении 3-й

помехой области максимума главного лепестка ДН, в которой селекция помехи не производится. При этом ширина зоны подавления сигнала помехой в диапазоне углов $\theta = [-12^\circ, 12^\circ]$ равна ширине ДН АР основного канала.

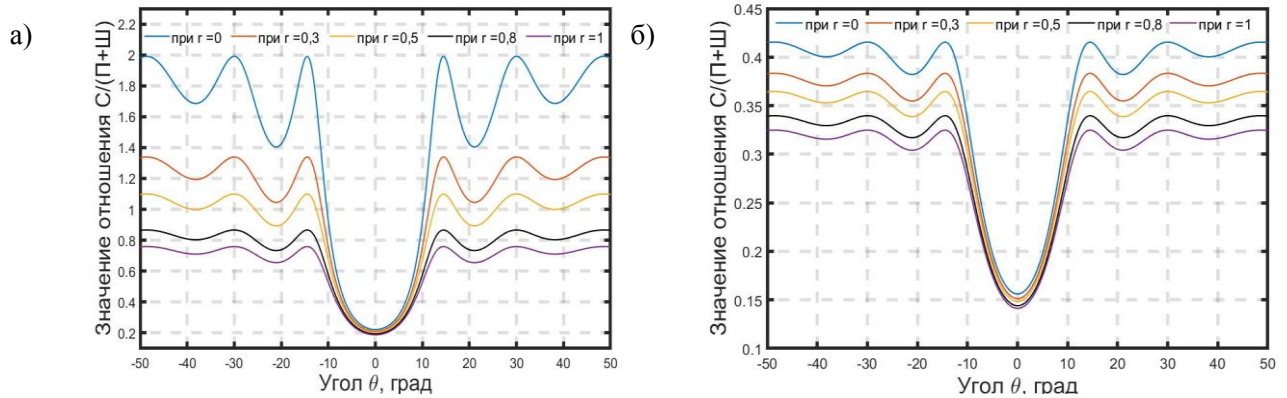


Рис. 6. Зависимость отношения $C/(П+Ш)$ на выходе АР основного канала УПС от коэффициента корреляции r между сигналом и 2-й помехой при сканировании 3-й помехи и стационарном положении 1-й и 2-й помех:
 $a - \theta_{п1} = 20^\circ; \theta_{п2} = -20^\circ; б - \theta_{п1} = 20^\circ; \theta_{п2} = -7^\circ$

На рис. 7,а показана зависимость отношения $C/(П+Ш)$ на выходе УПС с расширением от коэффициента корреляции r между сигналом и 2-й помехой при сканировании 3-й помехи в диапазоне углов $\theta_{п3} = [-50^\circ, 50^\circ]$ и фиксированном положении 1-й и 2-й помех в области боковых лепестков ДН $\theta_{п1} = 20^\circ, \theta_{п2} = -20^\circ$ в соответствии с рис. 2,а. Значения коэффициента корреляции r как параметра кривых указаны на графиках. Видно, что воздействие коррелированной с сигналом 2-й помехи в области боковых лепестков ДН $2 = -20^\circ$ проявляется слабо, а некоррелированная помеха при $\theta_{п1} = 20^\circ$ подавляется полностью.

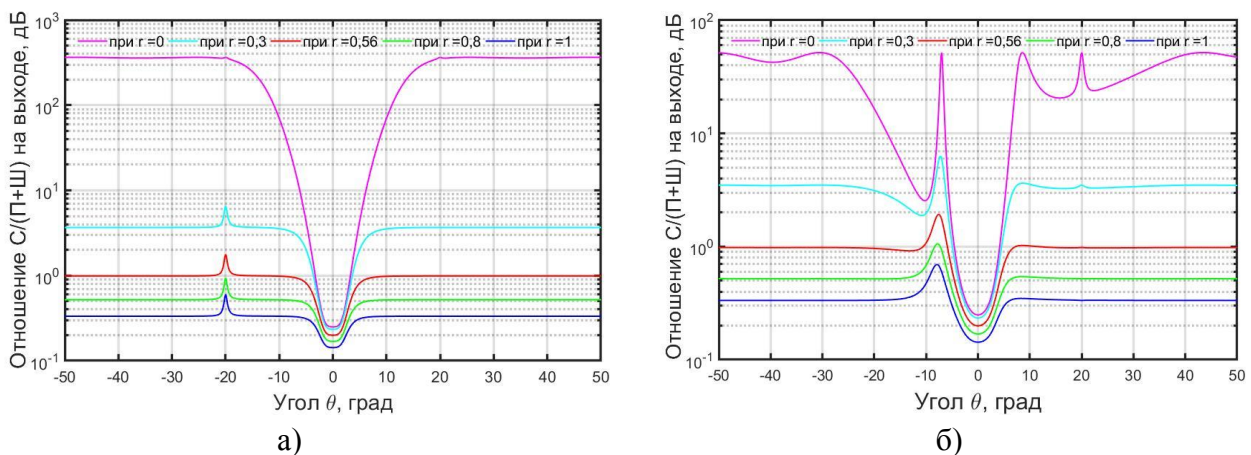


Рис. 7. Зависимость отношения $C/(П+Ш)$ на выходе УПС с расширением от коэффициента корреляции r между сигналом и 2-й помехой при сканировании 3-й помехи и стационарном положении 1-й и 2-й помех:
 $a - \theta_{п1} = 20^\circ; \theta_{п2} = -20^\circ; б - \theta_{п1} = 20^\circ; \theta_{п2} = -7^\circ$

На графиках выявилась сильная зависимость уровня сигнала на выходе УПС от величины коэффициента корреляции, когда уже при $r = r_{с,п2} = 0,3$ отношение $C/(П+Ш)$ уменьшается в 10 раз с 281 до 28. Значение коэффициента $r = 0,56$ является критическим, так как при даль-

нейшем его увеличении уровень мощность сигнала на выходе УПС становится меньше мощности сигнала даже при воздействии помехи в области боковых лепестков ДН.

Наибольшее подавление полезного сигнала происходит при сканировании по направлению помехи в секторе главного лепестка ДН, когда резко уменьшаются отношения $C/(П+Ш)$ – до 0,21. Причем ширина области подавления составляет $\pm 3,6^\circ$, что в 3 раза меньше ширины ДН $\pm 10^\circ$ стандартной АР, так как определяется шириной зоны защиты сигнала и шириной диаграммы уровней, т. е. видом матрицы преобразования A (6) или (8), а не шириной ДН основного канала.

Графики на рис. 7,б показывают изменение селективных свойств УПС при попадании 2-й коррелированной стационарной помехи в область главного лепестка ДН основного канала при $\theta_{п2} = -7^\circ$. Как и следовало ожидать, отношение сигнал/(помехи+шум) на выходе УПС в области боковых лепестков ДН уменьшилось на порядок с 127 до 13, даже при отсутствии корреляции ($r=0$).

В области главного лепестка в направлении прихода $\theta_{п2} = -7^\circ$ стационарной помехи адаптивной системой был сформирован «нуль» ДН глубиной – 62 дБ (см. рис. 4), который подавил помеху. Зона подавления сигнала в области главного лепестка определяется видом матрицы преобразования A (8) и составляет $\theta = [-4.9^\circ \ 4.5^\circ]$, что в 2,5 раза уже зоны подавления сигнала в стандартной АР (см. рис. 6). Следует отметить, что согласно графикам на рис. 7,а и б влияние корреляционной связи 2-й помехи одинаково, и при выбранных коэффициентах корреляции графики совпадают по уровню, и даже значение критического коэффициента $r = 0,56$ совпадает.

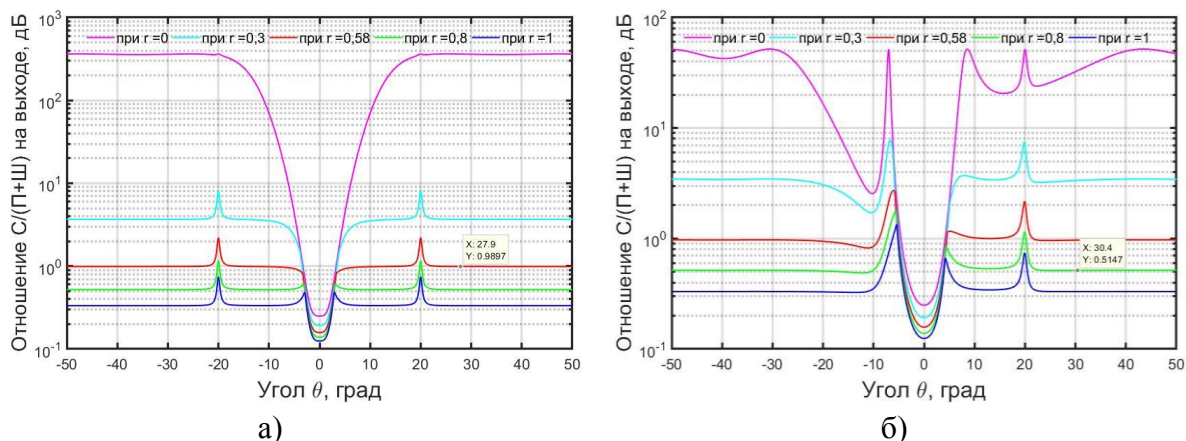


Рис. 8. Зависимость отношения $C/(П+Ш)$ на выходе УПС с расширением от коэффициента корреляции r между сигналом и сканирующей 1-й помехой при стационарном положении 2-й и 3-й помех:
а – $\theta_{п2} = 20^\circ$; $\theta_{п3} = -20^\circ$; б – $\theta_{п2} = -7^\circ$; $\theta_{п3} = 20^\circ$.

На рис. 8 представлены в логарифмическом масштабе графики, которые полностью повторяют условия эксперимента, показанные на рис. 7,а, б, за исключением того, что теперь коррелирована с сигналом сканирующая 3-я помеха, а направления воздействия стационарных некоррелированных 1-й и 2-й помех не изменились. Результаты моделирования показывают, что численные значения динамики изменения отношения $C/(П+Ш)$ в зависимости от величины взаимной корреляции сигнала и помех на выходе оптимизированной АР остались прежними. Только сильнее проявилось воздействие стационарных помех в области боковых лепестков при суммировании стационарной помехи с коррелированной сканирующей помехой. Ширина зоны подавления и значение критического коэффициента остались прежними.

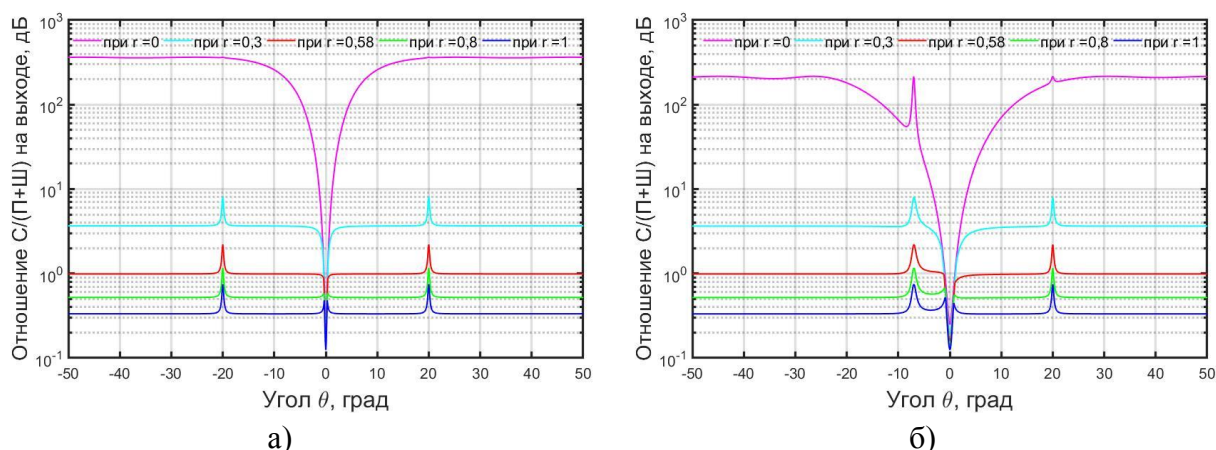


Рис. 9. Зависимость отношения $C/(П+Ш)$ на выходе УПС без расширения от коэффициента корреляции γ между сигналом и сканирующей 3-й помехой при стационарном положении 1-й и 2-й помех:
 $a - \theta_{п1} = 20^\circ; \theta_{п2} = -20^\circ$; $b - \theta_{п1} = -7^\circ; \theta_{п2} = 20^\circ$

В случае узкополосного сигнала, после захвата сигнала системой автосопровождения по направлению и системой частотной и фазовой автоподстройки по частоте, при воздействии мощной помехи в область основного лепестка ДН возможно использование УПС без расширения зоны защиты с матрицей преобразования \mathbf{A} (6). Как показывают графики на рис. 9, в этом случае в условиях сигнально-помеховой обстановки (см. рис. 2,а) УПС без расширения зоны защиты становится предпочтительнее, так как зона подавления сигнала в области главного лепестка ДН сужается по сравнению с результатами на рис. 8 в 2 раза и составляет $\theta = [-0.4^\circ 0.4^\circ]$ при отношении $C/(П+Ш)=1$, что в 2,5 раза уже зоны подавления сигнала в УПС с расширением и в 25 раз – зоны стандартной АР (см. рис. 6).

При воздействии одной из стационарных помех в область основного лепестка ДН основного канала УПС без расширения зона подавления сигнала расширяется до $\theta = [-0.8^\circ 0.8^\circ]$ при отношении $C/(П+Ш)=1$, но сохраняется преимущество в 5 раз по сравнению УПС с расширением и в 12 раз по сравнению со стандартной АР (см. рис. 6). Однако влияние корреляционной связи сигнала с помехой остается прежним, и значение критического коэффициента, при котором отношение $C/(П+Ш)$ становится меньше единицы, совпадает и равно $\gamma = 0,56$.

В отсутствие расширения УПС коррелированность помехи с сигналом влияет на соотношение $C/(П+Ш)$ так же, как и с расширением.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе всего изложенного можно сделать ряд выводов.

1. Использование адаптивного УПС компенсационного типа дает возможность производить выделение сигнала из смеси с помехами даже тогда, когда обычная АР не обеспечивает подавление помех в области главного лепестка.

2. Наличие корреляции между сигналом и помехами изменяет вид ковариационной матрицы сигнала и приводит к появлению на выходе антенной системы дополнительной корреляционной составляющей помехи, которая существенно ухудшает селективные свойства УПС компенсационного типа, уменьшая степень подавления помех и расширяя ДН в направлении помех.

3. Результаты численного моделирования показывают, что коррелированность помех резко снижает помехоустойчивость УПС с компенсацией даже при коэффициенте корреляции r с небольшим значением. Увеличение коэффициента корреляции от 0 до 0,3 приводит к снижению показателя $C/(П+Ш)$ на два порядка от 110–127 до 2,4–2,8 при АР с $L=8$ элементов.

4. При выбранных условиях вычислительного эксперимента значение коэффициента корреляции $r = 0,56$ является критичным, так как отношение $C/(П+Ш)$ на выходе УПС становится равным единице, оптимальный пространственный фильтр теряет свойства селекции, что равносильно потере эффективности.

5. На выходе УПС минимальное значение отношения $C/(П+Ш)$ равно 0,13–0,2 при совпадении углов прихода сканирующей помехи и сигнала, вследствие неподавления помех в максимуме главного лепестка ДН. Причем для УПС сектор области подавления составил $\pm 3,6^\circ$, что в 3 раза меньше зоны подавления $\pm 10^\circ$ стандартной АР, так как определяется не шириной ДН АР основного канала, а шириной диаграммы уровней УПС и зоны защиты сигнала, зависящими от вида выбранной матрицы преобразования $A_{дв}$ (7) в блоке предварительной фильтрации компенсационного канала.

6. На практике лучше использовать двойную $A_{дв}$ (7) или даже одинарную A (6) матрицу преобразования блока предварительной фильтрации БПФ, при которых УПС обладает высокими пространственными селективными свойствами, подавляет помехи во всей области боковых лепестков и в половине основного лепестка ДН. Дальнейшее увеличение кратности матрицы преобразования A (6) нецелесообразно в связи с расширением диаграммы уровней УПС до размера ДН основного канала и, за счет этого, со значительным ухудшением селективных свойств УПС.

Список используемых источников

1. Монзинго Р. А., Миллер Т. У. Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию. – М.: Радио и связь, 1986. – 448 с.
2. Пистолькорс А. А., Литвинов О. С. Введение в теорию адаптивных антенн. – М.: Наука, 1991. – 200 с.
3. Ермолаев В. Т., Флакман А. Г., Сорокин И. С. Регуляризованная оценка весового вектора адаптивного компенсатора помехи // Известия вузов. Радиофизика. – 2015. – Т. 58, № 12. – С. 1083–1093.
4. Грибов П. С., Шатилов А. Ю. Повышение эффективности пространственно-временной компенсации помех в радионавигационных приемниках за счет предварительной пространственной обработки сигналов от антенной решетки // Радиотехника. – 2019. – Т. 83, № 9(14). – С. 25–33.
5. Адаптивные компенсаторы помех. Принципы построения и применения / Б. Уидроу [и др.] // ТИИЭР. – 1975. – Т. 63, № 12. – С. 69–98.
6. Попов А. С. Пространственная селекция помех при разнесенном приеме сигналов // Известия вузов. Приборостроение. – 2017. – Т. 60, № 1. – С. 39–44.
7. Пат. 1840427 СССР, МКП Н01Q 3/26 (2006/1). Адаптивная антенная решетка / Григорьевский А. В., Ермолаев В. Т., Лузгин Л. С.; заявитель и патентообладатель Нижегород. научно-исследовательский ин-т радиотехники. – № 3135340/09; заявл. 20.02.1986; опубл. 20.03.2007, Бюл. № 8. – 20 с.
8. Звонарев В. В., Пименов В. Ф., Попов А. С. Метод расширения зоны защиты полезного сигнала в адаптивных антенных решетках с подавлением помех по главному лепестку диаграммы направленности // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2021. – Вып. 679. – С. 70–80.

9. Попов А. С., Пименов В. Ф. Моделирование характеристик антенной решетки, оптимальной по критерию минимума среднеквадратического отклонения, при взаимной корреляции сигнала и помех // Известия вузов. Радиофизика. – 2019. – Т. 62, № 9. – С. 704–714.

10. Пименов В. Ф., Попов А. С. Исследование эффективности оптимальной пространственной селекции помех в линейной антенной решетке по критерию минимума среднеквадратического отклонения // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 666. – С. 77–83.

В. Ф. Алексеев*,
доктор технических наук, профессор;

П. С. Гончаров*,
кандидат технических наук, доцент;

А. Н. Зуева**,
кандидат технических наук;

Д. В. Сергеев*,
кандидат технических наук

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

**Научно-исследовательский центр
(топогеодезического и навигационного обеспечения)

27 Центрального научно-исследовательского института МО РФ, г. Москва.

МЕТОДИКА ВЫЧИСЛЕНИЯ ЗНАЧЕНИЙ ТЕНЗОРА ВТОРЫХ ПРОИЗВОДНЫХ ГЕОПОТЕНЦИАЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

В статье предлагается методика вычисления составляющих тензора вторых производных геопотенциала с использованием современных моделей разложения гравитационного поля Земли в ряд по сферическим функциям. Приводятся уравнения для вычисления вторых производных в пространственной сферической системе координат и пространственной прямоугольной системе координат. Результаты вычислений с использованием предлагаемой методики сравниваются с оценками вторых производных геопотенциала, полученными по материалам обработки наблюдений спутника GOCE.

Ключевые слова: геопотенциал, гравитационное поле Земли, тензор вторых производных потенциала силы тяжести, система координат.

ВВЕДЕНИЕ

Для определения различных параметров возмущающего геопотенциала (высот квазигеоида над поверхностью общеземного эллипсоида, аномалий силы тяжести, составляющих уклонения отвесной линии в плоскостях меридиана и первого вертикала) используются модели гравитационного поля Земли (ГПЗ). Для практических работ наиболее пригодны три типа моделей [1, 2]:

- численно-аналитические модели в виде полностью нормированных коэффициентов разложения потенциала силы тяжести (притяжения) в ряд по сферическим функциям;
- модели в виде суперпозиции потенциала притяжения точечных масс;
- цифровые модели в виде осредненных значений параметров аномального гравитационного поля по сферическим трапециям определенного размера.

Приоритетным направлением работ в области изучения ГПЗ является создание моделей аномального ГПЗ в виде разложения возмущающего потенциала в ряд по сферическим функциям. Развитие средств вычислительной техники существенно снизило актуальность разработки альтернативных, более простых и компактных методов глобального представления ГПЗ, наиболее перспективным среди которых ранее считался метод точечных масс.

В настоящей статье предлагается методика вычисления вторых производных геопотенциала с использованием современных моделей гравитационного поля, представленных рядом сферических функций.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВТОРЫХ ПРОИЗВОДНЫХ ГЕОПОТЕНЦИАЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РАЗЛОЖЕНИЯ ГЕОПОТЕНЦИАЛА В РЯД ПО СФЕРИЧЕСКИМ ФУНКЦИЯМ

Для расчета значений тензора вторых производных потенциальной функции силы тяжести Земли (функции геопотенциала) необходимо определить тензоры вторых производных потенциальных функций силы притяжения Земли и центробежной силы инерции. В пространственной сферической системе координат, начало которой находится в центре масс Земли, а положение точки задается радиус-вектором \vec{r} и углами λ , φ , эти тензоры имеют вид [1, 2]

$$T_U = \begin{bmatrix} U_{rr} & U_{r\varphi} & U_{r\lambda} \\ U_{\varphi r} & U_{\varphi\varphi} & U_{\varphi\lambda} \\ U_{\lambda r} & U_{\lambda\varphi} & U_{\lambda\lambda} \end{bmatrix}; \quad (1)$$

$$T_{U_e} = \begin{bmatrix} U_{e_{rr}} & U_{e_{r\varphi}} & U_{e_{r\lambda}} \\ U_{e_{\varphi r}} & U_{e_{\varphi\varphi}} & U_{e_{\varphi\lambda}} \\ U_{e_{\lambda r}} & U_{e_{\lambda\varphi}} & U_{e_{\lambda\lambda}} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где T_U, T_{U_e} – тензоры вторых производных потенциалов силы притяжения Земли и центробежной силы в сферических координатах;

$U_{rr}, U_{r\varphi}, U_{r\lambda}$ – частные производные второго порядка потенциала силы притяжения Земли по координатам λ, φ, r ,

$$U_{rr} = \frac{\partial^2 U}{\partial r^2}, U_{r\varphi} = \frac{\partial^2 U}{\partial r \partial \varphi}, U_{r\lambda} = \frac{\partial^2 U}{\partial r \partial \lambda} \dots U_{\lambda\lambda} = \frac{\partial^2 U}{\partial \lambda^2};$$

$U_{e_{rr}}, U_{e_{r\varphi}}, U_{e_{r\lambda}}$ – частные производные второго порядка потенциала центробежной силы по координатам λ, φ, r ,

$$U_{e_{rr}} = \frac{\partial^2 U_e}{\partial r^2}, U_{e_{r\varphi}} = \frac{\partial^2 U_e}{\partial r \partial \varphi}, U_{e_{r\lambda}} = \frac{\partial^2 U_e}{\partial r \partial \lambda} \dots U_{e_{\lambda\lambda}} = \frac{\partial^2 U_e}{\partial \lambda^2}.$$

С учетом формул (1) и (2) тензор вторых производных потенциала силы тяжести Земли будет определяться из следующего матричного соотношения

$$T_W = T_U + T_{U_e}. \quad (3)$$

Для определения значений компонентов тензора вторых производных T_U в сферических координатах потенциал силы притяжения Земли представлен в следующем виде [1, 2]

$$U = \frac{\mu}{r} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{R}{r}\right)^n \sum_{m=0}^n (\bar{c}_{n,m} \cos m\lambda + \bar{s}_{n,m} \sin m\lambda) \bar{P}_{n,m}(\sin \varphi), \quad (4)$$

где λ, φ, r – геоцентрические долготы, широты и радиус-вектор точки, в которой вычисляются вторые производные;

μ – гравитационная постоянная Земли;

n, m – целые числа;

R – экваториальный радиус общего земного эллипсоида;

$\bar{c}_{n,m}, \bar{s}_{n,m}, \bar{P}_{n,m}(\sin \varphi)$ – нормированные коэффициенты и функции Лежандра гравитационного поля порядка n , индекса m .

Для определения значений компонентов тензора вторых производных T_{U_e} потенциал центробежной силы инерции представляем в следующем виде:

– в сферической системе координат

$$U_e = \frac{1}{2} \Omega_3^2 r^2 \cos^2(\varphi); \quad (5)$$

– в гринвичской системе координат

$$U_e = \frac{1}{2} \Omega_3^2 (x^2 + y^2), \quad (6)$$

где Ω_3 – угловая скорость вращения Земли.

Следует отметить, что вторые производные потенциальной функции силы тяжести Земли могут быть найдены с использованием пространственной прямоугольной системы координат, начало которой находится в центре масс Земли, ось z совпадает с осью вращения Земли, ось x лежит в плоскости экватора и направлена на нулевой меридиан, а ось y дополняет ее до правой системы координат (гринвичской системы координат).

Методика расчета значений тензора вторых производных потенциала силы тяжести Земли состоит из выполнения следующих этапов.

1. Определяется точка пространства, для которой рассчитываются вторые производные потенциала силы тяжести: λ, φ, r .

2. Находятся частные производные первого и второго порядка потенциала силы притяжения Земли U по координатам λ, φ, r : $U_r, U_\varphi, U_\lambda$ и $U_{rr}, U_{\varphi\varphi}, U_{\lambda\lambda}, U_{r\varphi}, U_{r\lambda}, U_{\varphi\lambda}$.

3. Находятся частные производные первого и второго порядка потенциала центробежной силы инерции U_e по координатам λ, φ, r : $U_{e_r}, U_{e_\varphi}, U_{e_\lambda}$ и $U_{e_{rr}}, U_{e_{\varphi\varphi}}, U_{e_{\lambda\lambda}}, U_{e_{r\varphi}}, U_{e_{r\lambda}}, U_{e_{\varphi\lambda}}$.

4. По найденным соотношениям рассчитываются значения тензоров вторых производных T_U и T_{U_e} .

5. Используя соотношение (3), путем матричного сложения вычисляются значения тензора вторых производных потенциала силы тяжести Земли T_W .

6. При необходимости выполняется пересчет значений тензора вторых производных потенциала силы тяжести Земли из сферических координат в пространственную прямоугольную систему координат.

В гринвичской системе координат тензор вторых производных потенциала силы тяжести будет иметь вид [3]

$$T_{W_{x,y,z}} = \begin{bmatrix} W_{xx} & W_{xy} & W_{xz} \\ W_{yx} & W_{yy} & W_{yz} \\ W_{zx} & W_{zy} & W_{zz} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где $W_{xx} = \frac{\partial^2 W_{x,y,z}}{\partial x^2}, W_{xy} = \frac{\partial^2 W_{x,y,z}}{\partial x \partial y}, W_{xz} = \frac{\partial^2 W_{x,y,z}}{\partial x \partial z}, \dots, W_{zz} = \frac{\partial^2 W_{x,y,z}}{\partial z^2}$ – частные производные второго порядка потенциала силы тяжести Земли по координатам x, y, z .

Составляющие тензоров (3) и (7), симметричные относительно главной диагонали, равны между собой, т. е. $W_{xy} = W_{yx}, W_{xz} = W_{zx}, W_{yz} = W_{zy}, W_{\varphi r} = W_{r\varphi}, W_{\lambda r} = W_{r\lambda}, W_{\varphi\lambda} = W_{\lambda\varphi}$.

Следовательно, в выражениях (3) и (7) достаточно определить только шесть вторых производных. Компоненты тензора вторых производных T_U в сферических координатах находятся по следующим соотношениям [2]:

$$\begin{aligned}
 U_{rr} &= \frac{\mu}{r} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{R}{r}\right)^n \sum_{m=0}^n \frac{(n+1)(n+2)}{r^2} (\bar{c}_{n,m} \cos m\lambda + \bar{s}_{n,m} \sin m\lambda) \bar{P}_{n,m}(\sin \varphi), \\
 U_{r\varphi} &= \frac{\mu}{r} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{R}{r}\right)^n \sum_{m=0}^n \frac{-(n+1)}{r} (\bar{c}_{n,m} \cos m\lambda + \bar{s}_{n,m} \sin m\lambda) \bar{P}'_{n,m}(\sin \varphi), \\
 U_{r\lambda} &= \frac{\mu}{r} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{R}{r}\right)^n \sum_{m=0}^n \frac{-(n+1)}{r^2} (m\bar{c}_{n,m} \sin m\lambda + m\bar{s}_{n,m} \cos m\lambda) \bar{P}_{n,m}(\sin \varphi), \\
 U_{\varphi\varphi} &= \frac{\mu}{r} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{R}{r}\right)^n \sum_{m=0}^n (\bar{c}_{n,m} \cos m\lambda + \bar{s}_{n,m} \sin m\lambda) \bar{P}''_{n,m}(\sin \varphi), \\
 U_{\varphi\lambda} &= \frac{\mu}{r} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{R}{r}\right)^n \sum_{m=0}^n (-m\bar{c}_{n,m} \sin m\lambda + m\bar{s}_{n,m} \cos m\lambda) \bar{P}'_{n,m}(\sin \varphi) \\
 U_{\lambda\lambda} &= -\frac{\mu}{r} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{R}{r}\right)^n \sum_{m=0}^n m^2 (\bar{c}_{n,m} \cos m\lambda + \bar{s}_{n,m} \sin m\lambda) \bar{P}_{n,m}(\sin \varphi)
 \end{aligned} \tag{8}$$

Входящие в формулу (8) нормированные функции Лежандра и их производные вычисляются по следующим рекуррентным соотношениям:

– для $n \geq 2$ и $n = m$

$$\begin{aligned}
 \bar{P}_{n,n} &= f_1 \cos \varphi \bar{P}_{n-1,n-1}, \\
 \bar{P}'_{n,n} &= f_1 [\cos \varphi \bar{P}'_{n-1,n-1} - \sin \varphi \bar{P}_{n-1,n-1}], \\
 \bar{P}''_{n,n} &= f_1 [\cos \varphi \bar{P}''_{n-1,n-1} - 2 \sin \varphi \bar{P}'_{n-1,n-1} - \cos \varphi \bar{P}_{n-1,n-1}];
 \end{aligned}$$

– для $n \geq 1$ и $n \neq m$

$$\begin{aligned}
 \bar{P}_{n,n-1} &= f_2 \sin \varphi \bar{P}_{n-1,n-1}, \\
 \bar{P}'_{n,n-1} &= f_2 [\cos \varphi \bar{P}_{n-1,n-1} - \sin \varphi \bar{P}'_{n-1,n-1}], \\
 \bar{P}''_{n,n-1} &= f_2 [\cos \varphi \bar{P}''_{n-1,n-1} + 2 \cos \varphi \bar{P}'_{n-1,n-1} - \sin \varphi \bar{P}_{n-1,n-1}];
 \end{aligned}$$

– для $n \geq 2$ и $n \neq m$

$$\begin{aligned}
 \bar{P}_{n,m} &= f_3 [f_4 \sin \varphi \bar{P}_{n-1,m} - f_5 \bar{P}_{n-2,m}], \\
 \bar{P}'_{n,m} &= f_3 [f_4 \sin \varphi \bar{P}'_{n-1,m} + f_4 \cos \varphi \bar{P}_{n-1,m} - f_5 \bar{P}'_{n-2,m}], \\
 \bar{P}''_{n,m} &= f_3 [f_4 \sin \varphi \bar{P}''_{n-1,m} + 2f_4 \cos \varphi \bar{P}'_{n-1,m} - f_4 \sin \varphi \bar{P}_{n-1,n-1} - f_5 \bar{P}''_{n-2,m}],
 \end{aligned}$$

где значения f_1, f_2, f_3, f_4, f_5 вычисляются по соотношениям:

$$\begin{aligned}
 f_1 &= \sqrt{\frac{2n+1}{2n}}, \\
 f_2 &= \sqrt{2n+1}, \\
 f_3 &= \sqrt{\frac{2n+1}{(n-m)(n+m)}}, \\
 f_4 &= \sqrt{2n-1},
 \end{aligned}$$

$$f_5 = \sqrt{\frac{(n+m-1)(n-m-1)}{2n-3}}.$$

Для начала расчета значений нормированных функций Лежандра и их производных используются следующие начальные соотношения:

$$\begin{aligned} \bar{P}_{0,0} &= 1, \quad \bar{P}'_{0,0} = 0, \quad \bar{P}''_{0,0} = 0, \\ \bar{P}_{1,1} &= \sqrt{3} \cos \varphi, \quad \bar{P}'_{1,1} = -\sqrt{3} \sin \varphi, \quad \bar{P}''_{1,1} = -\sqrt{3} \cos \varphi. \end{aligned}$$

Тензор вторых производных T_{U_e} в сферических координатах имеет вид

$$T_{U_e} = \begin{bmatrix} \Omega_3^2 \cos^2 \varphi & -\Omega_3^2 r^2 \cos 2\varphi & 0 \\ -\Omega_3^2 r^2 \cos 2\varphi & -\Omega_3^2 r \sin 2\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Таким образом, входящие в тензоры вторых производных T_U и T_{U_e} в сферических координатах компоненты полностью определены и позволяют выполнить расчеты значений тензора T_W в произвольной точке пространства.

Компоненты тензора вторых производных потенциала силы притяжения Земли в гринвичской системе координат находятся из матричных равенств:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} W_{xx} \\ W_{yx} \\ W_{zx} \end{bmatrix} &= J_1 \times V_{r,\varphi,\lambda} + J \times T_W \times j_1^T, \\ \begin{bmatrix} W_{xy} \\ W_{yy} \\ W_{zy} \end{bmatrix} &= J_2 \times V_{r,\varphi,\lambda} + J \times T_W \times j_2^T, \\ \begin{bmatrix} W_{xz} \\ W_{yz} \\ W_{zz} \end{bmatrix} &= J_3 \times V_{r,\varphi,\lambda} + J \times T_W \times j_3^T. \end{aligned} \quad (10)$$

Компоненты уравнения (10) находятся из следующих соотношений [4, 5]:

$$\begin{aligned} V_{r,\varphi,\lambda} = \begin{bmatrix} V_r \\ V_\varphi \\ V_\lambda \end{bmatrix} &= \frac{GM}{r} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{R}{r}\right)^n \sum_{m=0}^n \begin{bmatrix} -\frac{n+1}{r} (\bar{c}_{n,m} \cos m\lambda + \bar{s}_{n,m} \sin m\lambda) \bar{P}_{n,m}(\sin \varphi) \\ (\bar{c}_{n,m} \cos m\lambda + \bar{s}_{n,m} \sin m\lambda) \bar{P}'_{n,m}(\sin \varphi) \\ (-m\bar{c}_{n,m} \sin m\lambda + m\bar{s}_{n,m} \cos m\lambda) \bar{P}_{n,m}(\sin \varphi) \end{bmatrix} + \\ &+ \begin{bmatrix} \Omega_3^2 r \cos^2(\varphi) \\ -\frac{1}{2} \Omega_3^2 r^2 \sin(2\varphi) \\ 0 \end{bmatrix}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 J &= \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \lambda & -\frac{\sin \varphi \cos \lambda}{r} & \frac{\sin \lambda}{r \cos \varphi} \\ \cos \varphi \sin \lambda & -\frac{\sin \varphi \sin \lambda}{r} & \frac{\cos \lambda}{r \cos \varphi} \\ \sin \varphi & \frac{\cos \varphi}{r} & 0 \end{bmatrix}; \\
 j_1 &= \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \lambda & -\frac{\sin \varphi \sin \lambda}{r} & \frac{\sin \lambda}{r \cos \varphi} \end{bmatrix}; \\
 j_2 &= \begin{bmatrix} \cos \varphi \sin \lambda & \frac{\sin \varphi \sin \lambda}{r} & \frac{\cos \lambda}{r \cos \varphi} \end{bmatrix}; \\
 j_3 &= \begin{bmatrix} \sin \varphi & \frac{\cos \varphi}{r} & 0 \end{bmatrix}; \\
 J_1 &= \begin{bmatrix} \frac{1}{r} [1 - \cos^2 \varphi \cos^2 \lambda] & \frac{\operatorname{tg} \varphi}{r^2} [(2 \cos^2 \varphi + 1) \cos^2 \lambda - 1] & \frac{\sin 2\lambda}{r^2 \cos^2 \varphi} \\ -\frac{\sin 2\lambda \cos^2 \varphi}{2r} & \frac{\sin 2\varphi \sin 2\lambda}{4r^2} [3 + \operatorname{tg}^2 \varphi] & -\frac{\cos 2\lambda}{r^2 \cos^2 \varphi} \\ -\frac{\sin 2\varphi \cos \lambda}{2r} & -\frac{\cos \lambda \cos 2\varphi}{r^2} & 0 \end{bmatrix}; \\
 J_2 &= \begin{bmatrix} -\frac{\sin 2\lambda \cos^2 \varphi}{2r} & \frac{\sin 2\varphi \sin 2\lambda}{4r^2} [3 + \operatorname{tg}^2 \varphi] & -\frac{\cos 2\lambda}{r^2 \cos^2 \varphi} \\ \frac{1}{r} [1 - \cos^2 \varphi \sin^2 \lambda] & \frac{\operatorname{tg} \varphi}{r^2} [(2 \cos^2 \varphi + 1) \sin^2 \lambda - 1] & -\frac{\sin 2\lambda}{r^2 \cos^2 \varphi} \\ -\frac{\sin 2\varphi \sin \lambda}{2r} & -\frac{\sin \lambda \cos 2\varphi}{r^2} & 0 \end{bmatrix}; \\
 J_3 &= \begin{bmatrix} -\frac{\sin 2\varphi \cos \lambda}{2r} & -\frac{\cos 2\varphi \cos \lambda}{r^2} & 0 \\ -\frac{\sin 2\varphi \sin \lambda}{2r} & -\frac{\cos 2\varphi \sin \lambda}{r^2} & 0 \\ \frac{\cos^2 \varphi}{r} & \frac{\sin 2\varphi}{r^2} & 0 \end{bmatrix}.
 \end{aligned}$$

Таким образом, входящие в тензор вторых производных потенциала силы тяжести в прямоугольных координатах компоненты также будут полностью определены.

Исходными данными для расчета вторых производных потенциала силы тяжести являются:

– координаты точки в сферической системе координат, в которой производится расчет вторых производных: λ, φ, r ;

– модель гравитационного поля Земли в виде нормированных коэффициентов: $\bar{C}_{n,m}, \bar{S}_{n,m}$;

– порядок n и индекс m , до которых учитывается разложение гравитационного поля Земли в ряд по сферическим функциям Лежандра.

Для вычисления составляющих тензора вторых производных геопотенциала была выбрана отечественная модель, входящая в систему геодезических параметров ПЗ-90.11 [2], содержащая сферические гармоники до 360 степени и порядка. Из зарубежных использовались наиболее современные модели EGM2008, EIGEN-6C4-2 и XGM2019e-2159, число гармонических коэффициентов в которых имеет порядок и степень 2190. Вычисления вторых производных с применением любой модели выполнялись при полном наборе входящих в них сферических гармоник.

В ходе исследований вычислялись вторые производные потенциала притяжения (без учета влияния центробежного ускорения). Это было сделано для обеспечения контроля результатов вычислений. Теоретической основой контроля результатов вычислений являлось уравнение Лапласа $V_{XX} + V_{YY} + V_{ZZ} = 0$ [2], которое описывает гармоническую функцию потенциала притяжения во внешнем по отношению к притягивающим массам пространстве. Результаты вычислений показали, что значения сумм вторых производных, вычисленных с использованием уравнения Лапласа, изменялись по абсолютной величине в пределах 0.01 до 3.41 Этвеш. Причем приведенный диапазон изменений оказался практически одинаковым для всех исследуемых моделей гравитационного поля Земли.

На первом этапе выполнялось сравнение значений вторых производных потенциала притяжения, вычисленных в одноименных точках с применением различных цифровых моделей. Всего было выбрано 25 точек в различных районах Земли со значениями нормальных высот в диапазоне от 42 до 5000 м. Результаты вычислений вторых производных потенциала притяжения, находящихся на главной диагонали тензора, приведены в табл. 1–3.

Таблица 1

Средние квадратические расхождения вторых производных потенциала притяжения V_{XX} (первая строка), V_{YY} (вторая строка), V_{ZZ} (третья строка), вычисленных с применением различных цифровых моделей гравитационного поля Земли (Этвеш)

Модель	EGM2008	ПЗ-90.11	EIGEN-6C4-2	XGM 2019e-2159
EGM2008		<u>15.25</u> 6.57 19.92	<u>0.39</u> 0.49 0.55	<u>2.82</u> 3.73 4.19
ПЗ-90.11	<u>15.25</u> 6.57 19.92		<u>15.19</u> 6.61 19.85	<u>15.54</u> 7.43 21.08
EIGEN-6C4-2	<u>0.39</u> 0.49 0.55	<u>15.19</u> 6.61 19.85		<u>2.89</u> 3.87 4.25
XGM 2019e-2159	<u>2.82</u> 3.73 4.19	<u>15.54</u> 7.43 21.08	<u>2.89</u> 3.87 4.25	

Анализ полученных оценок позволяет сделать следующие выводы:

1. Составляющие тензора вторых производных потенциала притяжения, вычисленные в различных точках с применением цифровой модели EGM2008, практически точно соответствуют одноименным производным, определенным по модели EIGEN-6C4-2. Средние квадратические расхождения результатов, полученные при использовании этих моделей, ни для одной производной не превысили 0.6 Этвеш.

2. Вторые производные потенциала притяжения, вычисленные с использованием гармонических коэффициентов, входящих в модель ПЗ-90, наиболее значительно отличаются от

оценок, полученных при применении других моделей. Так, среднее квадратическое расхождение вторых вертикальных производных, характеризующих изменение силы притяжения по высоте, вычисленных с использованием моделей EGM2008 и ПЗ-90.11, составляет порядка 20 Этвеш, а различие этих производных, рассчитанных по моделям XGM2019e-2159 и ПЗ-90.11, превышает уже и указанную величину. Это, очевидно, показывает, что любую цифровую модель, содержащую гармонические коэффициенты только до 360 степени и порядка, нецелесообразно применять для оценки вторых производных геопотенциала, так как такие модели не содержат информацию о локальной структуре гравитационного поля в исследуемом районе. По всей видимости, для определения составляющих тензора вторых производных геопотенциала следует использовать модели гравитационного поля Земли с числом гармонических коэффициентов не менее 2000.

3. Оценки составляющих тензора вторых производных потенциала притяжения, полученные с использованием модели XGM2019e-2159, в целом хорошо согласовываются с результатами расчетов по моделям EGM2008 и EIGEN-6C4-2. Наибольшие средние квадратические расхождения значений вторых производных по всем исследуемым зарубежным моделям не превысили 3.9 Этвеш для составляющих тензора, характеризующих форму уровенной поверхности V_{XX}, V_{YY}, V_{ZZ} , и 4.4 Этвеш для градиентов силы притяжения (V_{XX}, V_{YY}, V_{ZZ}). Следовательно, сделанный вывод о необходимости использования цифровых моделей гравитационного поля с числом гармонических коэффициентов $n = m \geq 2000$, является правильным.

На втором этапе исследований были использованы результаты измерений вторых производных геопотенциала, выполненных с низкоорбитального спутника GOCE. Всего определено пять точек, значения вторых производных геопотенциала в которых были пересчитаны в горизонтную систему координат и приняты в качестве эталонных. Далее, применяя различные модели гравитационного поля Земли, вычислялись составляющие тензора вторых производных геопотенциала в этих же точках. Результаты расчетов для составляющих, находящихся на главной диагонали тензора, их сравнение с эталонными данными приведены в табл. 2–4.

Таблица 2

Значения вторых производных потенциала притяжения V_{XX} (Этвеш), вычисленных с применением различных цифровых моделей гравитационного поля Земли (числитель), и их расхождения с эталонными данными (знаменатель)

Номер точки	Эталонное значение	Модель гравитационного поля Земли			
		EGM2008	ПЗ-90.11	EIGEN-6C4-2	XGM 2019e-2159
1	-1364.8295	$\frac{-1370.2384}{-5.4089}$	$\frac{-1370.2417}{-5.4122}$	$\frac{-1370.2383}{-5.4088}$	$\frac{-1370.2385}{-5.4089}$
2	-1367.2883	$\frac{-1371.2380}{-3.9497}$	$\frac{-1371.2185}{-3.9301}$	$\frac{-1371.2393}{-3.9510}$	$\frac{-1371.2392}{-3.9509}$
3	-1368.7045	$\frac{-1369.4891}{-0.7846}$	$\frac{-1369.4844}{-0.7799}$	$\frac{-1369.4890}{-0.7845}$	$\frac{-1369.4890}{-0.7845}$
4	-1364.1912	$\frac{-1368.5519}{-4.3608}$	$\frac{-1368.5543}{-4.3631}$	$\frac{-1368.5518}{-4.3606}$	$\frac{-1368.5518}{-4.3607}$
5	-1355.1332	$\frac{-1356.5388}{-1.4056}$	$\frac{-1356.5371}{-1.4039}$	$\frac{-1356.5389}{-1.4057}$	$\frac{-1356.5389}{-1.4057}$

Таблица 3

Значения вторых производных потенциала притяжения V_{YY} (Этвеш), вычисленных с применением различных цифровых моделей гравитационного поля Земли (числитель), и их расхождения с эталонными данными (знаменатель)

Номер точки	Эталонное значение	Модель гравитационного поля Земли			
		EGM2008	ПЗ-90.11	EIGEN-6C4-2	XGM 2019e-2159
1	-1360.8900	$\frac{-1360.8823}{0.0077}$	$\frac{-1360.8812}{0.0089}$	$\frac{-1360.8821}{0.0080}$	$\frac{-1360.8824}{0.0077}$
2	-1363.4925	$\frac{-1363.4797}{0.0128}$	$\frac{-1363.4686}{0.0239}$	$\frac{-1363.4809}{0.0116}$	$\frac{-1363.4809}{0.0116}$
3	-1366.3247	$\frac{-1366.3092}{0.0155}$	$\frac{-1366.3143}{0.0105}$	$\frac{-1366.3085}{0.0163}$	$\frac{-1366.3086}{0.0162}$
4	-1360.9986	$\frac{-1360.9913}{0.0073}$	$\frac{-1360.9948}{0.0038}$	$\frac{-1360.9912}{0.0074}$	$\frac{-1360.9913}{0.0073}$
5	-1353.3945	$\frac{-1353.4072}{-0.0127}$	$\frac{-1353.4020}{-0.0075}$	$\frac{-1353.4080}{-0.0135}$	$\frac{-1353.4079}{-0.0134}$

Таблица 4

Значения вторых производных потенциала притяжения V_{ZZ} (Этвеш), вычисленных с применением различных цифровых моделей гравитационного поля Земли (числитель), и их расхождения с эталонными данными (знаменатель)

Номер точки	Эталонное значение	Модель гравитационного поля Земли			
		EGM2008	ПЗ-90.11	EIGEN-6C4-2	XGM 2019e-2159
1	2725.7508	$\frac{2730.8586}{5.1078}$	$\frac{2730.8608}{5.1100}$	$\frac{2730.8582}{5.1075}$	$\frac{2730.8587}{5.1079}$
2	2730.7743	$\frac{2735.6039}{4.8296}$	$\frac{2735.5731}{4.7988}$	$\frac{2735.6063}{4.8320}$	$\frac{2735.6062}{4.8319}$
3	2735.0166	$\frac{2738.1510}{3.1344}$	$\frac{2738.1517}{3.1350}$	$\frac{2738.1502}{3.1335}$	$\frac{2738.1503}{3.1337}$
4	2725.1998	$\frac{2729.3974}{4.1976}$	$\frac{2729.4034}{4.2036}$	$\frac{2729.3972}{4.1974}$	$\frac{2729.3973}{4.1975}$
5	2708.5535	$\frac{2710.8282}{2.2747}$	$\frac{2710.8210}{2.2675}$	$\frac{2710.8290}{2.2756}$	$\frac{2710.8290}{2.2755}$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты вычисления вторых производных потенциала притяжения с использованием исследуемых моделей хорошо согласуются (на уровне 0.001–0.01 Этвеш) между собой. Причем этот вывод справедлив для всех производных и всех точек, в которых производились расчеты. Такая сходимость оценок может быть объяснена тем, что на высоте орбиты спутника GOCE (260–280 км) сглаживаются высокочастотные составляющие гравитационного поля, и, следовательно, для расчетов вполне достаточно применять цифровые модели, ограниченные гармоническими коэффициентами до 360 степени и порядка.

Цифровые модели, содержащие коэффициенты представления геопотенциала рядом сферических функций, обеспечивают корректное определение на спутниковых высотах вторых производных, характеризующих форму уровневой поверхности потенциала притяжения (V_{XX} и V_{YY}), и вертикального градиента силы притяжения V_{ZZ} . Использовать данные модели для оценки горизонтальных градиентов силы притяжения (V_{XZ} и V_{YZ}) нецелесообразно, так как ошибки расчетов будут сопоставимы с величинами самих параметров.

Список используемых источников

1. Шимбирев Б. П. Теория фигуры Земли: учебник для вузов по специальности «Астрономогеодезия». – М.: Недра, 1975. – 431 с.
2. Пантелеев В. Л. Теория фигуры Земли: курс лекций. – М.: МГТУ им. М. В. Ломоносова, 2000. – 98 с.
3. Параметры Земли 1990 года (ПЗ-90.11): справочный документ. – М.: Военно-топографическое управление Генерального штаба Вооруженных Сил Российской Федерации, 2014. – 52 с.
4. Теория полета ракет-носителей / Г. И. Кудин [и др.]. – МО РФ, 1994. – 736 с.
5. Keller W., Mohammad A. Sharifi, Satellite gradiometry using a satellite pair // Journal of Geodesy. – April 2005.

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

МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ПРОГНОСТИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСОТЫ НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ ОБЛАЧНОСТИ НА ОСНОВЕ ПОЛУЭМПИРИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ

Получены оценки оправдываемости прогнозов высоты нижней границы облачности с помощью полуэмпирических зависимостей на примере района г. Санкт-Петербург. Рассмотрен способ адаптации этих зависимостей к новому географическому району. По результатам численных экспериментов обозначены временные периоды внутри календарного года, когда прогностические уравнения дают удовлетворительные результаты.

Ключевые слова: высота нижней границы облачности, полуэмпирические методы, прогноз метеорологических условий

ВВЕДЕНИЕ

Распределение облачности в атмосфере, ее годовой и суточный ход, повторяемость различных высот нижней границы облачности – в метеорологии остаются не до конца исследованными вопросами. Причинами этого являются субъективный характер некоторых наблюдений за облачностью и недостаточное количество станций наблюдений. Поэтому при отсутствии или недостаточном количестве наблюдений за характеристиками облачности для их прогнозирования используются физико-статистические методы, которые основаны на эмпирических или полуэмпирических зависимостях, полученных из опыта.

Известным недостатком физико-статистических методов является зависимость качества прогноза от физико-географических условий. Поэтому использование конкретного метода прогнозирования в различных географических районах требует его адаптации. Адаптация метода прогнозирования возможна либо путем построения новых эмпирических или полуэмпирических зависимостей, либо путем расчета поправочных коэффициентов к уже известным уравнениям.

В статье рассматривается метод построения прогностических уравнений для определения высоты нижней границы облачности (ВНГО) на примере района г. Санкт-Петербург, приводятся оценки оправдываемости и точности прогнозов.

ПОЛУЭМПИРИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВНГО

Известно, что нижняя граница облаков располагается вблизи уровня конденсации, поэтому с практической точки зрения при прогнозе ВНГО хорошо себя зарекомендовала известная в метеорологии формула Ферреля [1–3], по которой определяется высота уровня конденсации (H_k) в зависимости от значений дефицита точки росы (d) у поверхности земли,

$$H_k = H_{\text{нго}} = 122 \cdot (T - Td), \quad (1)$$

где $H_{\text{нго}}$ – ВНГО (в метрах);

T – температура воздуха;

Td – температура точки росы.

Иначе

$$H_{\text{нго}} = 122 \cdot d, \text{ где } d = T - Td.$$

Формула применима, когда облачность образуется в результате термической или динамической турбулентности, например, в холодное время года, если $d > 1^\circ\text{C}$, метеорологическая дальность видимости $S_M > 4$ км, а скорость ветра $ff > 2$ м/с.

Формула Ферреля пригодна и для прогнозирования ВНГО конвективных облаков, когда синоптическая обстановка существенно не меняется. Она требует апробации для различных географических районов с целью определения соответствующих местных поправок. Следует иметь в виду, что полученные значения по этой формуле часто бывают несколько занижены по сравнению с данными инструментальных наблюдений.

Если известна относительная влажность воздуха f , то высоту уровня конденсации можно определить по формуле А. Н. Ипполитова

$$H_{\text{нго}} = 24 \cdot (100 - f). \quad (2)$$

Аналогичные результаты могут быть получены также с помощью безымянных формул:

$$H_{\text{нго}} = 122 \cdot (107 - f); \quad (3)$$

$$H_{\text{нго}} = 5400 \cdot (2 - \lg f). \quad (4)$$

Взяв за основу формулы (1)–(4), можно получить прогностические уравнения для определения ВНГО в любом географическом районе путем пересчета в них поправочных коэффициентов. Рассмотрим метод, который позволяет реализовать эту процедуру.

МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ПРОГНОСТИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВНГО И ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ПРОГНОЗА

Для разработки метода использовались ряды данных метеорологических наблюдений за 2005–2016 гг. Формулы (1)–(4) были получены для определенных групп синоптических ситуаций, поэтому испытывать их на всем ряду наблюдений не имеет смысла, необходимо разбиение ряда на отдельные группы по сформулированным признакам. Таких разбиений проведем пять:

- по сезонам года;
- по значениям дефицита точки росы;
- по значениям дефицита точки росы в различные сезоны года;
- по естественным климатическим сезонам;
- по значениям дефицита точки росы в различные естественные климатические сезоны.

Схема метода приведена на рис. 1.

Для каждой группы рассчитываются прогностические значения ВНГО и вычисляется абсолютная ошибка прогноза за каждый срок наблюдений по формулам (1)–(4). Затем строится распределение ошибок прогноза по градациям (в метрах): -300; -200; -150; -120; -110; -100; 0; 100; 110; 120; 150; 200; 300; 600; 1000. Вычисляются частота и вероятность попаданий значений ошибок прогноза в каждую градацию. Центральные градации объединяются в интервал от минус 110 до 110 м, и суммируются вероятности попаданий значений ошибок прогноза в этом интервале. Полученное значение будет характеризовать оправдываемость прогноза (P^n) с точностью до 110 м. В качестве характеристики точности прогноза используется средняя абсолютная ошибка ($\bar{\eta}_{\text{нго}}$). Если она отрицательная, то прогностические значения ВНГО занижены, если положительная – завышены.

Для определения местных поправок к формулам последовательно в большую или меньшую сторону изменяются значения их первых коэффициентов, пересчитываются прогностические значения, и анализируется оправдываемость прогноза. Когда оправдываемость про-

гноза достигает максимального значения, фиксируются новые коэффициенты, в формулы вводятся поправки, оценивается точность прогноза.



Рис. 1. Схема метода построения прогностических уравнений для определения ВНГО заданного района

Для зимы и лета в Санкт-Петербурге прогностические выражения и оценки качества прогнозов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Оценки качества прогноза ВНГО зимой и летом в г. Санкт-Петербурге

Сезон					
Зима			Лето		
Формула	P^n	$\bar{\eta}_{\text{ВНГО}}, \text{ м}$	Формула	P^n	$\bar{\eta}_{\text{ВНГО}}, \text{ м}$
$H_{\text{ВНГО}} = 14(107 - f)$	0,747	-31	$H_{\text{ВНГО}} = 13(107 - f)$	0,463	-53
$H_{\text{ВНГО}} = 23,9(100 - f)$	0,622	-10	$H_{\text{ВНГО}} = 24(100 - f)$	0,327	135
$H_{\text{ВНГО}} = 183d$	0,553	37	$H_{\text{ВНГО}} = 182d$	0,241	419
$H_{\text{ВНГО}} = 5100(2 - \lg f)$	0,591	5	$H_{\text{ВНГО}} = 4700(2 - \lg f)$	0,309	172

Из анализа табл. 1 следует, что в среднем для зимы выражения (1)–(4) дают удовлетворительные результаты. Наилучший прогноз с оправдываемостью около 75% дает формула (3), она же летом в 46% случаев прогнозирует низкую облачность, занижая прогноз в среднем на 50 м. Остальные формулы в целом для лета не применимы.

Оправдываемость прогнозов ВНГО можно повысить, если учесть значения дефицита точки росы.

Результаты проверки этого предположения без учета сезонности представлены в табл. 2. Здесь формулы (1)–(4) дают лучшие результаты при $d \leq 2$, за исключением формулы (4) при $d \leq 1$. При $d > 2$ оправдываемость и точность прогнозов для всех случаев становятся одинаковыми и заметно уменьшаются. Это можно объяснить тем, что ВНГО увеличивается и облачность эволюционирует, формулы при этом одинаково не работают.

Рассмотрим оценки качества прогноза ВНГО по сезонам года при $d \leq 1$ (табл. 3).

Таблица 2

**Оценки качества прогноза ВНГО по значениям дефицита точки росы
(г. Санкт-Петербург)**

Дефицит точки росы, °С					
$d \leq 1$			$1 < d \leq 2$		
Формула	$P^{\text{п}}$	$\bar{\eta}_{\text{НГО}}, \text{ м}$	Формула	$P^{\text{п}}$	$\bar{\eta}_{\text{НГО}}, \text{ м}$
$H_{\text{НГО}} = 18,5(107 - f)$	0,777	-28	$H_{\text{НГО}} = 13,8(107 - f)$	0,846	-70
$H_{\text{НГО}} = 48(100 - f)$	0,704	-20	$H_{\text{НГО}} = 25(100 - f)$	0,793	-51
$H_{\text{НГО}} = 262d$	0,673	-66	$H_{\text{НГО}} = 172,9d$	0,797	-45
$H_{\text{НГО}} = 5700(2 - \lg f)$	0,503	-125	$H_{\text{НГО}} = 4850(2 - \lg f)$	0,746	-79
Дефицит точки росы, °С					
$2 < d \leq 3$			$3 < d \leq 4$		
Формула	$P^{\text{п}}$	$\bar{\eta}_{\text{НГО}}, \text{ м}$	Формула	$P^{\text{п}}$	$\bar{\eta}_{\text{НГО}}, \text{ м}$
$H_{\text{НГО}} = 10,7(107 - f)$	0,707	-148	$H_{\text{НГО}} = 8(107 - f)$	0,549	-226
$H_{\text{НГО}} = 14,8(100 - f)$	0,706	-156	$H_{\text{НГО}} = 10,8(100 - f)$	0,547	-221
$H_{\text{НГО}} = 94,5d$	0,707	-160	$H_{\text{НГО}} = 62,2d$	0,549	-238
$H_{\text{НГО}} = 3160(2 - \lg f)$	0,706	-153	$H_{\text{НГО}} = 2270(2 - \lg f)$	0,547	-214
Дефицит точки росы, °С					
$d > 4$			—		
Формула	$P^{\text{п}}$	$\bar{\eta}_{\text{НГО}}, \text{ м}$	—	—	—
$H_{\text{НГО}} = 11(107 - f)$	0,329	-71	—	—	—
$H_{\text{НГО}} = 12(100 - f)$	0,339	-110	—	—	—
$H_{\text{НГО}} = 60d$	0,319	-124	—	—	—
$H_{\text{НГО}} = 1780(2 - \lg f)$	0,335	-184	—	—	—

Таблица 3

Оценки качества прогноза ВНГО по сезонам года при $d \leq 1$ (г. Санкт-Петербург)

Сезоны года ($d \leq 1$)					
Зима			Весна		
Формула	$P^{\text{п}}$	$\bar{\eta}_{\text{НГО}}, \text{ м}$	Формула	$P^{\text{п}}$	$\bar{\eta}_{\text{НГО}}, \text{ м}$
$H_{\text{НГО}} = 16(107 - f)$	0,842	-36	$H_{\text{НГО}} = 22(107 - f)$	0,800	8
$H_{\text{НГО}} = 40(100 - f)$	0,724	-38	$H_{\text{НГО}} = 51(100 - f)$	0,738	-15
$H_{\text{НГО}} = 310d$	0,741	-19	$H_{\text{НГО}} = 306d$	0,730	-46
$H_{\text{НГО}} = 7800(2 - \lg f)$	0,725	-60	$H_{\text{НГО}} = 7700(2 - \lg f)$	0,650	-90
Лето			Осень		
Формула	$P^{\text{п}}$	$\bar{\eta}_{\text{НГО}}, \text{ м}$	Формула	$P^{\text{п}}$	$\bar{\eta}_{\text{НГО}}, \text{ м}$
$H_{\text{НГО}} = 22,5(107 - f)$	0,749	-28	$H_{\text{НГО}} = 21(107 - f)$	0,754	-4
$H_{\text{НГО}} = 68(100 - f)$	0,589	18	$H_{\text{НГО}} = 40(100 - f)$	0,665	-61
$H_{\text{НГО}} = 310d$	0,652	-65	$H_{\text{НГО}} = 295d$	0,661	-44
$H_{\text{НГО}} = 7300(2 - \lg f)$	0,572	-141	$H_{\text{НГО}} = 7800(2 - \lg f)$	0,657	-86

Для всех сезонов года при $d \leq 1$ формулы (1)–(4) (за исключением формулы (4) для лета) могут с успехом быть применимы, т. е. совместный учет сезонности и значений дефицита точки росы повышает качество прогнозирования \approx до 25%.

Разложим один сезон, например, самый неблагоприятный для апробации формул (1)–(4) – лето, по значениям дефицита точки росы (табл. 4). Из табл. 4 видно, что при $d \leq 1$ пригодны формулы (1)–(3), а при $1 < d \leq 2$ – формулы (1), (4). При бо́льших значениях дефицита точ-

ки росы летом облачность нижнего яруса в Санкт-Петербурге наблюдается редко, что и демонстрируют приведенные оценки.

Таблица 4

Оценки качества прогноза ВНГО по значениям дефицита точки росы, лето (г. Санкт-Петербург)

Дефицит точки росы, °С					
$d \leq 1$			$1 < d \leq 2$		
Формула	$P^{\text{п}}$	$\bar{\eta}_{\text{НГО}}, \text{ М}$	Формула	$P^{\text{п}}$	$\bar{\eta}_{\text{НГО}}, \text{ М}$
$H_{\text{НГО}} = 22,5(107 - f)$	0,749	-28	$H_{\text{НГО}} = 14(107 - f)$	0,751	-129
$H_{\text{НГО}} = 68(100 - f)$	0,589	18	$H_{\text{НГО}} = 24(100 - f)$	0,672	-132
$H_{\text{НГО}} = 310d$	0,652	-65	$H_{\text{НГО}} = 170d$	0,679	-96
$H_{\text{НГО}} = 7300(2 - \lg f)$	0,572	-141	$H_{\text{НГО}} = 6400(2 - \lg f)$	0,712	-81
Дефицит точки росы, °С					
$2 < d \leq 3$			$3 < d \leq 4$		
Формула	$P^{\text{п}}$	$\bar{\eta}_{\text{НГО}}, \text{ М}$	Формула	$P^{\text{п}}$	$\bar{\eta}_{\text{НГО}}, \text{ М}$
$H_{\text{НГО}} = 11(107 - f)$	0,625	-179	$H_{\text{НГО}} = 10(107 - f)$	0,525	-196
$H_{\text{НГО}} = 17(100 - f)$	0,625	-165	$H_{\text{НГО}} = 13(100 - f)$	0,525	-205
$H_{\text{НГО}} = 100d$	0,625	-168	$H_{\text{НГО}} = 70d$	0,525	-223
$H_{\text{НГО}} = 3500(2 - \lg f)$	0,625	-173	$H_{\text{НГО}} = 2700(2 - \lg f)$	0,525	-203
Дефицит точки росы, °С					
$d > 4$			—		
Формула	$P^{\text{п}}$	$\bar{\eta}_{\text{НГО}}, \text{ М}$	—	—	—
$H_{\text{НГО}} = 11(107 - f)$	0,360	-57	—	—	—
$H_{\text{НГО}} = 12(100 - f)$	0,359	-95	—	—	—
$H_{\text{НГО}} = 49d$	0,340	-175	—	—	—
$H_{\text{НГО}} = 1780(2 - \lg f)$	0,348	-169	—	—	—

Интересен еще один анализ результатов прогнозирования ВНГО в периоды времени, соответствующие естественным климатическим сезонам [4, 5]. Оценки качества прогноза ВНГО в периоды естественных климатических сезонов в г. Санкт-Петербурге без учета дефицита точки росы приведены в табл. 5.

При делении года на ЕКС оправдываемость и точность прогноза ВНГО в сравнении с прогнозами по календарным сезонам в холодный период года растут. В теплый период года оправдываемость снижается до 30–40%, но точность при этом в большинстве случаев остается в пределах допустимых погрешностей.

В рамках настоящей статьи напомним старый, но эффективный способ текущего прогнозирования ВНГО для случаев, когда за несколько часов (2–3 ч) до момента начала действия прогноза ($H_{\text{НГО}}^*$) существует возможность получения фактической информации о ВНГО ($H_{\text{НГО}}^{\phi}$) [2].

Если $\Delta H_{\text{НГО}} = H_{\text{НГО}}^* - H_{\text{НГО}}^{\phi} < -50$, то в ближайшие 2–3 часа следует ожидать облачность с ВНГО $H_{\text{НГО}}^* + \Delta H_{\text{НГО}}$ без ее понижения.

Если $\Delta H_{\text{НГО}} = H_{\text{НГО}}^* - H_{\text{НГО}}^{\phi} > 50$, то в ближайшие 2–3 часа следует ожидать понижение облачности с ВНГО $H_{\text{НГО}}^* - \Delta H_{\text{НГО}}$.

Если $-50 < \Delta H_{\text{НГО}} = H_{\text{НГО}}^* - H_{\text{НГО}}^{\phi} < 50$, то полученное прогностическое значение удовлетворяет требованиям по точности, прогноз оправдался.

Таблица 5

**Оценки качества прогноза ВНГО в периоды ЕКС без учета дефицита точки росы
(г. Санкт-Петербург)**

Естественные климатические сезоны					
№ 1 –23.12-15.01			№ 2 –16.01-21.03		
Формула	$P^{\text{п}}$	$\bar{\eta}_{\text{ВНГО}}, \text{ м}$	Формула	$P^{\text{п}}$	$\bar{\eta}_{\text{ВНГО}}, \text{ м}$
$H_{\text{ВНГО}} = 13(107 - f)$	0,763	-49	$H_{\text{ВНГО}} = 12(107 - f)$	0,717	-69
$H_{\text{ВНГО}} = 24(100 - f)$	0,643	-5	$H_{\text{ВНГО}} = 24(100 - f)$	0,579	14
$H_{\text{ВНГО}} = 182d$	0,606	25	$H_{\text{ВНГО}} = 182d$	0,526	55
$H_{\text{ВНГО}} = 5100(2 - \lg f)$	0,617	-4	$H_{\text{ВНГО}} = 5100(2 - \lg f)$	0,545	23
№ 3 –22.03-17.04			№ 4 –18.04-14.05		
Формула	$P^{\text{п}}$	$\bar{\eta}_{\text{ВНГО}}, \text{ м}$	Формула	$P^{\text{п}}$	$\bar{\eta}_{\text{ВНГО}}, \text{ м}$
$H_{\text{ВНГО}} = 12(107 - f)$	0,551	-73	$H_{\text{ВНГО}} = 12(107 - f)$	0,552	-43
$H_{\text{ВНГО}} = 20(100 - f)$	0,428	12	$H_{\text{ВНГО}} = 20(100 - f)$	0,411	68
$H_{\text{ВНГО}} = 115d$	0,394	4	$H_{\text{ВНГО}} = 120d$	0,383	123
$H_{\text{ВНГО}} = 3800(2 - \lg f)$	0,406	17	$H_{\text{ВНГО}} = 4200(2 - \lg f)$	0,393	151
№ 5 –15.05-26.05			№ 6 –27.05-10.06		
Формула	$P^{\text{п}}$	$\bar{\eta}_{\text{ВНГО}}, \text{ м}$	Формула	$P^{\text{п}}$	$\bar{\eta}_{\text{ВНГО}}, \text{ м}$
$H_{\text{ВНГО}} = 12(107 - f)$	0,423	-58	$H_{\text{ВНГО}} = 12(107 - f)$	0,480	-37
$H_{\text{ВНГО}} = 13(100 - f)$	0,335	-114	$H_{\text{ВНГО}} = 18(100 - f)$	0,358	40
$H_{\text{ВНГО}} = 129d$	0,301	233	$H_{\text{ВНГО}} = 100d$	0,328	77
$H_{\text{ВНГО}} = 4200(2 - \lg f)$	0,304	191	$H_{\text{ВНГО}} = 3790(2 - \lg f)$	0,348	125
№ 7 –11.06-07.07			№ 8 –08.07-09.08		
Формула	$P^{\text{п}}$	$\bar{\eta}_{\text{ВНГО}}, \text{ м}$	Формула	$P^{\text{п}}$	$\bar{\eta}_{\text{ВНГО}}, \text{ м}$
$H_{\text{ВНГО}} = 13(107 - f)$	0,455	-21	$H_{\text{ВНГО}} = 12(107 - f)$	0,464	-91
$H_{\text{ВНГО}} = 22(100 - f)$	0,338	127	$H_{\text{ВНГО}} = 15(100 - f)$	0,372	-98
$H_{\text{ВНГО}} = 100d$	0,338	59	$H_{\text{ВНГО}} = 120d$	0,304	121
$H_{\text{ВНГО}} = 3500(2 - \lg f)$	0,337	51	$H_{\text{ВНГО}} = 3200(2 - \lg f)$	0,334	-39
№ 9 –10.08-17.10			№ 10 –18.10-10.12		
Формула	$P^{\text{п}}$	$\bar{\eta}_{\text{ВНГО}}, \text{ м}$	Формула	$P^{\text{п}}$	$\bar{\eta}_{\text{ВНГО}}, \text{ м}$
$H_{\text{ВНГО}} = 16(107 - f)$	0,495	-61	$H_{\text{ВНГО}} = 15(107 - f)$	0,692	-43
$H_{\text{ВНГО}} = 24(100 - f)$	0,415	-26	$H_{\text{ВНГО}} = 24(100 - f)$	0,594	-33
$H_{\text{ВНГО}} = 131d$	0,382	-40	$H_{\text{ВНГО}} = 140d$	0,575	-65
$H_{\text{ВНГО}} = 4690(2 - \lg f)$	0,391	-28	$H_{\text{ВНГО}} = 4700(2 - \lg f)$	0,574	-53

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, для прогноза ВНГО нижнего яруса можно воспользоваться полуэмпирическими методами – формулами Ферреля, А. Н. Ипполитова и им подобными. На примере района г. Санкт-Петербург они дают удовлетворительные результаты:

- для холодного периода года;
- для отдельных сезонов года при $d \leq 2^{\circ}\text{C}$;
- для естественных климатических сезонов года с учетом и без учета дефицита точки росы.

Кроме того, качество прогнозов по формулам (1)–(4) можно повысить путем построения зависимостей по отдельным срокам и времени суток, таким образом можно опосредованно учесть влияние особенностей местности на ВНГО.

Список используемых источников

1. *Богаткин О. Г.* Основы авиационной метеорологии: учебник. – СПб.: Изд-во РГГМУ, 2009. – 339 с.
2. Руководство по прогнозированию метеорологических условий для авиации / под ред. К. Г. Абрамович, А. А. Васильевой. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 301 с.
3. *Матвеев Л. Т.* Курс общей метеорологии. Физика атмосферы: учебник. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 750 с.
4. *Алёхин С. Г., Иванов Р. Д., Чернышов С. В.* Классификация естественных климатических сезонов года на основе анализа временных рядов среднесуточной температуры воздуха // Современные проблемы гидрометеорологии и устойчивого развития Российской Федерации: сб. тез. Всероссийской научно-практической конф. СПб. 14-15 марта 2019 г. – СПб.: РГГМУ, 2019. – С. 46–47.
5. *Алёхин С. Г., Иванов Р. Д.* Определение границ климатических сезонов года на основе метода разложения полей среднесуточной температуры воздуха по естественным ортогональным функциям // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2020. – Вып. 674. – С. 80–85.

В. Ф. Алексеев,
доктор технических наук, профессор;
А. В. Астапович,
кандидат технических наук, доцент;
К. К. Жбанов;
Д. О. Медяников,
кандидат технических наук

МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА ПО ДАННЫМ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СТЕРЕОСЪЕМКИ И РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ, С УЧЕТОМ АНОМАЛЬНОСТИ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Предложен метод построения цифровых моделей рельефа в системе нормальных высот, основанный на совместной обработке топогеодезической информации, получаемой в результате фотограмметрической обработки оптико-электронных стереоснимков и интерферометрической обработки радиолокационных изображений. Для перехода к системе нормальных высот используются модели гравитационного поля Земли.

Описаны основные этапы реализации метода. Выполнена классификация рельефа на основе анализа его статистических характеристик, рассчитан оптимальный шаг дискретизации моделей рельефа в зависимости от степени пересеченности местности. Определены требования к исходным данным. Обоснована возможность применения точек пространственной фототриангуляции в качестве опорных пунктов при интерферометрической обработке радиолокационных изображений. Теоретически доказано, что предлагаемый подход к совместной обработке моделей рельефа, полученных по разнородным данным космической съемки, позволяет повысить точность определения высот до 30% относительно только одного метода съемки.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, цифровая модель рельефа, нормальная высота, оптико-электронная стереосъемка, радиолокационная интерферометрия, метод наименьших квадратов, уравнивание матриц высот.

ВВЕДЕНИЕ

Определение высот рельефа на недоступные физико-географические районы наиболее целесообразно осуществлять методами дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Сенсоры ДЗЗ могут размещаться на различных платформах, таких как беспилотный летательный аппарат, самолет или космический аппарат (КА). К методам космического ДЗЗ, позволяющим получать высоту рельефа, относятся следующие виды съемок: оптико-электронная стереоскопическая и радиолокационная интерферометрическая.

Получение геодезических данных методами оптико-электронной и радиолокационной съемки основано на различных физических принципах. Каждый метод имеет свои сильные и слабые стороны. Вместе с тем оба метода съемки нашли широкое распространение в геодезической практике.

Анализ тактико-технических характеристик современных оптико-электронных и радиолокационных КА, представленных в [1–6], позволил сделать вывод, что уровень пространственного разрешения лучших съемочных систем составляет несколько дециметров, а точность построения цифровых моделей рельефа (ЦМР) методами космической съемки характеризуется средней квадратической ошибкой (СКО) 4–7 м (в зависимости от степени пересеченности местности).

Повышение точности построения ЦМР, полученных методами космической съемки на недоступные территории, до 3–5 м (в зависимости от степени пересеченности местности) является актуальной задачей, решение которой позволит расширить спектр их применения. Цель

проведенной работы заключалась в повышении точности построения ЦМР на недоступные территории, что возможно осуществить или путем совершенствования съемочных систем космических аппаратов, или путем совершенствования методов обработки съемочной информации.

Обладая многими достоинствами, первый путь не предполагает быстрого получения результата, вследствие необходимости проведения трудоемких и затратных работ по проектированию, запуску и летным испытаниям перспективных космических аппаратов. Поэтому в настоящей работе основное внимание уделено второму пути повышения точности построения ЦМР.

Совершенствование методов фотограмметрической обработки оптико-электронных снимков рассматривается в работах [6, 7] и др. Примерами работ, в которых рассматривается совершенствование методов интерферометрической обработки, являются [5, 8, 9]. Как при фотограмметрической, так и при интерферометрической обработке космических снимков пикетные точки области картографирования расположены хаотично, приведение пикетных точек в узлы регулярной сетки ЦМР осуществляется с помощью алгоритмов интерполяции. В ходе интерполяции неизбежно снижение точности ЦМР. Эта проблема решалась в работе [10]. Реализация предложений, приведенных в указанной работе, предполагает модернизацию существующих и разработку новых программных продуктов для тематической обработки космических снимков.

К настоящему времени общемировой парк КА картографического назначения стал достаточно обширен. Как следствие, имеется значительное количество оптико-электронных стереоснимков и радиолокационных изображений на одни и те же территории.

Исходя из вышесказанного, предлагается в качестве альтернативного пути повышения точности построения ЦМР на недоступные территории применить комплексирование результатов фотограмметрической и интерферометрической обработки соответствующих типов снимков. Задачей данной статьи является описание метода построения ЦМР, основой которого является уравнивание матриц высот, полученных в результате обработки материалов оптико-электронной стереосъемки и радиолокационной интерферометрии, с использованием математического аппарата метода наименьших квадратов.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДА ПОСТРОЕНИЯ ЦМР НА ОСНОВЕ УРАВНИВАНИЯ МАТРИЦ ВЫСОТ, ПОЛУЧЕННЫХ ПО ДАННЫМ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СТЕРЕОСЪЕМКИ И РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ, С ПРИВЛЕЧЕНИЕМ ИНФОРМАЦИИ ОБ АНОМАЛЬНОСТИ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Метод построения цифровых моделей рельефа на основе уравнивания матриц высот, полученных по данным оптико-электронной стереосъемки и радиолокационной интерферометрии, с привлечением информации об аномальности гравитационного поля Земли (ГПЗ), схематично представленный на рис. 1, включает в себя следующие этапы.

Этап 1. Расчет оптимального шага дискретизации ЦМР в зависимости от степени пересеченности местности.

Под оптимальным шагом дискретизации ЦМР следует понимать такой шаг дискретизации рельефа, при котором картографируемая поверхность будет представлена, с одной стороны, с требуемой точностью, а с другой стороны – с минимальным расходом информационных ресурсов.

Проблема определения дискретности представления функций, применительно к картографированию параметров аномального гравитационного поля Земли, решалась в работах [11, 12].

тяжести (АСТ) осуществлялся с использованием марковской модели II порядка. Этот же подход, но с использованием марковской модели IV порядка, применительно к задаче дискретизации рельефа, реализован в работе [13]. Там же получено уравнение

$$\Delta = R_H^4 \sqrt[4]{\frac{d}{0,07D_H}} = R_H^4 \sqrt[4]{\frac{m_H^2}{0,07D_H}}, \quad (1)$$

где Δ – расстояние между узловыми точками ЦМР;

D_H – дисперсия высот рельефа;

R_H – радиус корреляции высот рельефа;

m_H – средняя квадратическая ошибка (СКО) определения высот рельефа.

В работе [12] задача определения оптимальной дискретности решалась исходя из начального условия, что спектр ошибок за счет осреднения исходной функции АСТ по площадкам размером $\Delta x \times \Delta y$ представляет собой разность спектров Фурье для полного и сглаженного сигналов.

В результате преобразований с использованием марковской модели IV порядка получено следующее уравнение применительно к задаче дискретизации рельефа:

$$m_H^2 = 140 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{D_H(\omega_x^2 + \omega_y^2)}{4\pi\mu^5 [\mu^{-2} + (\omega_x^2 + \omega_y^2)]^{5/2}} \left(1 - \frac{\sin \frac{\Delta x \cdot \omega_x}{2}}{\frac{\Delta x \cdot \omega_x}{2}} \cdot \frac{\sin \frac{\Delta y \cdot \omega_y}{2}}{\frac{\Delta y \cdot \omega_y}{2}} \right)^2 d\omega_x d\omega_y, \quad (2)$$

где (ω_x, ω_y) – круговые частоты;

D_H – дисперсия функции $H(x, y)$;

μ – параметр, связанный с радиусом корреляции высот рельефа R_H соотношением $\mu = R_H/1,860$.

С помощью уравнения (2) оптимальная дискретность находится методом итераций для допустимых значений m_H и по заданным статистическим характеристикам рельефа.

При решении задачи расчета оптимальной детальности представления рельефа в виде ЦМР использовались оба рассмотренных подхода с целью сопоставления полученных результатов. Важно отметить, что и тот и другой подходы используют гипотезу об изотропности оцениваемой функции, что, применительно к рельефу, выполняется крайне редко. Поэтому для получения объективных оценок дискретности потребовалось решить две задачи: 1) выполнить районирование рельефа по сложности его структуры; 2) оценить оптимальную дискретность представления рельефа для различных его типов, используя зависимости (1) и (2) [14].

Результаты решения первой задачи представлены в табл. 1, а результаты решения второй задачи – в табл. 2.

Таблица 1

Возможные значения дисперсий и радиусов корреляции, характерные для различных форм рельефа

Тип рельефа	Дисперсия, м ²	Радиус корреляции, м						
		50	100	500	1000	2000	5000	10000
Равнинный	200	50	100	500	1000	2000	5000	10000
Холмистый	5000							
Низкие горы	50000							
Средневысокие горы	150000							
Высокие горы	3000000							

Таблица 2

Расчет оптимальной дискретности представления ЦМР для различных статистических характеристик рельефа, м

Тип рельефа	Дисперсия, м ²	Применяемая формула	Радиус корреляции, м						
			50	100	500	1000	2000	5000	10000
<i>m_H = 3 м</i>									
Равнинный	200	1	45	90	448	895	1791	4477	8954
		2	60	98	476	953	1908	4780	9595
Холмистый	5000	1	20	40	200	400	801	2002	4004
		2	25	39	179	359	719	1800	3609
<i>m_H = 4 м</i>									
Низкие горы	50000	1	13	26	130	260	520	1300	2600
		2	16	25	112	224	448	1122	2250
<i>m_H = 5 м</i>									
Средневысокие горы	150000	1	11	22	110	221	442	1104	2209
		2	13	21	94	188	377	943	1890
Высокие горы	3000000	1	5	10	52	104	209	522	1045
		2	6	10	43	86	172	432	866

Относительные расхождения значений дискретности, вычисленных с использованием двух различных подходов, не превышают 25%. Рассчитанные значения тем больше, чем ниже степень пересеченности местности (т. е. дисперсия высот рельефа) и чем больше радиус корреляции рельефа.

В общем случае радиус корреляции может принимать широкий диапазон значений на ограниченном участке местности. Вычислять радиус корреляции для каждого картографируемого участка местности неудобно с практической точки зрения. Поэтому в качестве максимально допустимого расстояния между узловыми точками модели рельефа следует установить значения дискретности, рассчитанные при минимально возможном радиусе корреляции, что необходимо для гарантированного выполнения требований к точности восстановления функции рельефа в форме дискретных значений на любом участке местности.

Для различных типов рельефа установим фиксированное значение дискретности для создания ЦМР, которое рассчитано при минимальном радиусе корреляции. При этом из двух решений [по формулам (1) и (2)], полученных для различных типов рельефа, выберем наименьшее значение.

Таким образом, предлагается установить дискретность определения исходных данных для создания ЦМР в слабо-, средне- и сильнопересеченных районах на уровне 20, 10 и 5 м соответственно.

После того как установлена дискретность ЦМР, необходимо рассмотреть этап подбора и предварительной обработки измерительной информации.

Этап 2. Подбор и предварительная обработка измерительной информации. Они включают в себя:

1. Подбор ДЗЗ в зависимости от их пространственного разрешения и точности построения ЦМР.

2. Расчет допустимой дискретности расположения исходных пунктов на недоступной территории.

3. Расчет максимально достижимого эффекта от совместной обработки разнородных данных и обоснование допустимого расхождения в точности исходных материалов.

В табл. 3 представлена точность определения высот рельефа (СКО) в зависимости от масштаба и степени пересеченности картографируемой территории [15].

Таблица 3

СКО определения высот рельефа в зависимости от масштаба и типа рельефа картографируемой территории, м

Тип рельефа	Масштаб				
	1:5 000	1:10 000	1:25 000	1:50 000	1:100 000
Равнинный	0,4	0,7	1,2	3,5	7,0
Холмистый	0,5	0,9	2,3	4,2	9,9
Низкие горы	0,9	1,2	2,3	7,0	14,1
Средневысокие горы	2,3	2,3	2,3	7,0	14,1
Высокие горы	2,3	2,3	4,6	14,1	28,2

Рассмотрев данные табл. 3, становится понятно, что построение ЦМР с точностью 3–5 м (в зависимости от степени пересеченности местности) возможно только с использованием материалов космической съемки, предназначенных для картографирования территорий в масштабе 1:25 000 и крупнее.

Анализ источников [1–6], в которых представлены тактико-технические характеристики оптико-электронных и радиолокационных КА, позволяет сделать вывод, что для создания ЦМР с точностью 3–5 м подходят оптико-электронные стереоснимки, имеющие пространственное разрешение не более 2,5 м, и радиолокационные изображения с пространственным разрешением до 5 м.

Пространственное разрешение снимка оказывает влияние не только на точность создания с его помощью ЦМР, но и на площадь картографируемой территории. Чем выше разрешение снимка, тем меньшая территория на нем отображается. Поэтому необходимо рассчитать требуемую плотность исходных пунктов на зондируемой территории.

Расчет необходимого количества опорных пунктов на недоступную территорию выполним только для оптико-электронной стереосъемки по следующим причинам:

1. При сопоставимой площади снимков количество пунктов больше, чем необходимо для обеспечения обработки оптико-электронных стереоснимков.

2. Исходные пункты намного проще дешифрировать на снимках оптического диапазона.

3. Трудность дешифрирования опорных пунктов на радиолокационных изображениях диктует необходимость их расположения только на тех участках местности, которые однозначно дешифрируются на таких изображениях (перекрестки дорог, мосты, углы зданий, опоры ЛЭП и т. п.). Исходя из небольшого количества исходных пунктов на недоступной территории, трудно рассчитывать, что все имеющиеся пункты будут опознаны на радиолокационном изображении. Вместе с тем в процессе фотограмметрической обработки оптико-электронных стереоснимков возможно определить пространственное положение исходных пунктов, необходимых для интерферометрической обработки радиолокационных снимков, в достаточном количестве и с требуемой точностью методом фототриангуляционного сгущения.

Рассчитаем дискретность расположения исходных пунктов применительно к съемочным данным КА «Ресурс-П». Для оптико-электронной стереосъемки продольное перекрытие снимков должно составлять не менее 60%. В ходе выполнения космической стереосъемки речь идет не об одиночной стереопаре, а о съемочном маршруте, состоящем из 15–20 снимков. Маршруты объединяются в блоки с поперечным перекрытием не менее 30%. В блоке может быть 10 и более маршрутов. Опорные пункты на стереопаре, маршруте, блоке должны располагаться по схеме «конверта», т. е. один пункт в центре и по одному пункту в каждом углу стереопостроения – всего не менее пяти пунктов [15].

Для спутников «Ресурс-П» максимальная протяженность маршрута составляет 115 км [4]. Принимая во внимание, что блок может состоять из 10 маршрутов с 50%-ным поперечным

перекрытием [15], размер блока стереоснимков составит 115×209 км. Площадь снимаемой территории будет равняться 24035 км^2 . Исходя из обязательности наличия не менее пяти исходных пунктов на район стереопостроения, нетрудно вычислить, что на недоступной территории необходимо иметь минимум один пункт на 4800 км^2 , что соответствует расстоянию между смежными пунктами порядка 70 км. Такая дискретность исходных пунктов на недоступной территории вполне достижима.

Для интерферометрической обработки радиолокационных снимков необходимо наличие одного–трех пунктов на парные изображения (интерферометрическую цепочку) [9]. Принимая размер радиолокационного изображения равным 30×30 км, получим требуемую плотность исходных пунктов, равную один пункт на 300 км^2 , т. е. расстояние между смежными пунктами должно быть около 17 км.

Такая плотность пунктов может быть достигнута, если выполнить пространственное фототриангуляционное сгущение сети в процессе фотограмметрической обработки оптико-электронных стереоснимков. В современных программных продуктах этот процесс автоматизирован, необходимо только выбрать точки сети фототриангуляции на снимке. Согласно [15] точки сетей фотограмметрического сгущения должны располагаться на хорошо распознаваемых контурах, которые размещаются на плоских участках местности, не имеющих ощутимых наклонов и кажущихся горизонтальными. Не допускается выбор точек на крутых скатах, затененных участках, в оврагах и лощинах. Поэтому задача подбора опорных точек для интерферометрической обработки снимков сводится к выбору на оптико-электронных снимках точек, которые будут гарантированно опознаны на радиолокационном изображении, с учетом требований к точкам фототриангуляции, которые перечислены выше.

Точность сетей фототриангуляционного сгущения возможно вычислить на основании допусков, изложенных в [15]: СКО планового положения $m_{ХУ}$, равное 0,25 мм в масштабе карты (плана), СКО высотного положения m_H , равное 0,2 высоты сечения рельефа. В табл. 4 представлены расчетные значения СКО планового и высотного положения пунктов пространственной фототриангуляции, в зависимости от масштаба создаваемых карт (планов) и типа рельефа.

Таблица 4

СКО планового и высотного положения пунктов фототриангуляции, в зависимости от масштаба карты (плана) и типа рельефа

Тип рельефа	Масштаб								
	1:5 000			1:10 000			1:25 000		
	$m_{ХУ}$, м	Высота сечения рельефа, м	m_H , м	$m_{ХУ}$, м	Высота сечения рельефа, м	m_H , м	$m_{ХУ}$, м	Высота сечения рельефа, м	m_H , м
Равнинный	1,25	1,0	0,2	2,50	2,0	0,4	6,25	2,5	0,5
Холмистый		1,0	0,2		2,0	0,4		5,0	1,0
Низкие горы		2,0	0,4		2,5	0,5		5,0	1,0
Средневысокие горы		5,0	1,0		5,0	1,0		5,0	1,0
Высокие горы		5,0	1,0		5,0	1,0		10,0	2,0

Анализ данных табл. 4 позволяет сделать вывод о возможности использования точек пространственного фототриангуляционного сгущения в качестве опорных пунктов для интерферометрической обработки радиолокационных изображений.

После того как требования к снимкам (пространственное разрешение, точность создания ЦМР) и дискретности исходных пунктов стали известны, необходимо рассчитать эффект от совместной обработки разнородных данных и установить допустимое расхождение в точности исходных материалов.

Основу предлагаемого метода составляет уравнивание ЦМР, полученных в результате обработки материалов оптико-электронной стереосъемки и радиолокационной интерферометрии, т. е. совместная обработка двух различных видов измерений одной величины (высоты рельефа).

Известно [16], что избыточные измерения повышают точность конечного результата. Для случая уравнивания измерений с равными весами (иначе говоря, равноточных измерений) справедлива формула среднего соотношения весов [16]

$$\frac{P}{p} \approx \frac{n}{k}, \quad (3)$$

где P – вес уравненного значения измеренной величины;

p – вес измеренного значения величины;

k – число необходимых величин;

n – число измеренных величин.

Применительно к задаче уравнивания высот, определенных методами оптико-электронной стереосъемки и радиолокационной интерферометрии, в формуле (3) можно принять: p – вес измерения высоты одним каким-либо методом, равный 1; k – число необходимых методов измерения высоты, равное 1; n – число используемых методов определения высоты, равное 2. Тогда вес P уравненного значения высоты, определенной двумя методами, будет равен 2.

СКО уравненного значения высоты (M_H) вычисляется из выражения [16]

$$M_H = \mu \sqrt{\frac{1}{P}},$$

где μ – СКО единицы веса. Величина μ принимается равной m_H – СКО определения высоты с помощью только одного метода ДЗЗ. Следовательно,

$$M_H = m_H \sqrt{\frac{1}{P}} = m_H \sqrt{0,5} = 0,7m_H. \quad (4)$$

Таким образом, в случае уравнивания ЦМР, полученных в результате обработки материалов оптико-электронной стереосъемки и радиолокационной интерферометрии, теоретически возможно повысить точность определения высот на 30% относительно использования только одного вида информации.

Необходимо понимать, что в действительности точность определения высот различными методами ДЗЗ не может быть абсолютно одинаковой – измерения одним из методов будут иметь больший вес, другим – меньший.

Пусть второй набор данных имеет меньшую точность и, следовательно, меньший вес по сравнению с первым набором данных: $m_{H_2} > m_{H_1} \Rightarrow p_{H_2} < p_{H_1}$. Выясним, при каком соотношении m_{H_2}/m_{H_1} средних квадратических ошибок измерений разными методами эффект повышения точности при совместном уравнивании двух наборов данных будет заметен, т. е. будет выполняться неравенство

$$\frac{M_H}{m_{H_1}} \leq 1 - \varepsilon, \quad (5)$$

где M_H – СКО высот из совместного уравнивания двух наборов данных;

m_{H_1} – СКО высот из уравнивания первого набора данных;

ε – малая положительная величина, принимаемая в качестве критерия повышения точности при совместном уравнивании двух наборов данных.

После очевидных преобразований выражения (5) получим уравнение [17]

$$\frac{m_{H_2}}{m_{H_1}} \geq \sqrt{\frac{(1-\varepsilon)^2}{2\varepsilon - \varepsilon^2}}. \quad (6)$$

Установив минимум ожидаемого повышения точности, равный 20%, получим, что точность исходных высотных данных оптико-электронной стереосъемки и радиолокационной интерферометрии не должна отличаться более чем в 1,3 раза.

Решение задачи подбора и предварительной обработки съемочной информации позволяет перейти к рассмотрению процесса интерферометрической и фотограмметрической обработки снимков.

Этап 3. Фотограмметрическая и интерферометрическая обработка снимков. Она рассмотрена достаточно подробно в специальной литературе, поэтому останавливаться на этом вопросе нет необходимости. Вместе с тем два аспекта обработки снимков требуют отдельного рассмотрения: 1) апостериорная оценка точности результатов обработки, реализованная внутри программных продуктов, 2) алгоритмы интерполяции нерегулярных значений высотных отметок в узлы регулярной сетки.

Оценка точности определения высот (СКО) m_H при фотограмметрической обработке снимков осуществляется по формуле [18]

$$m_H = m_f \sqrt{\left(\frac{m_p}{p}\right)^2 + \left(\frac{x^2}{fp} m_{\Delta\alpha}\right)^2 + \left(\frac{xy}{fp} m_{\Delta\omega}\right)^2 + \left(\frac{y}{p} m_{\Delta\chi}\right)^2 + \left(\frac{x}{f} m_{\Delta\nu}\right)^2}, \quad (7)$$

где m_f – СКО определения фокусного расстояния;
 m_p – СКО определения продольного параллакса на стереопаре;
 p – продольный параллакс;
 x, y – измеренные координаты точки на снимке;
 f – фокусное расстояние камеры;
 $m_{\Delta\nu}, m_{\Delta\alpha}, m_{\Delta\omega}, m_{\Delta\chi}$ – СКО взаимного ориентирования снимков.

Таким образом, ошибки определения высот по стереоснимкам зависят от ошибок построения и измерения снимков, ошибок их ориентирования, а также от положения пикетных точек на снимках. То есть каждая точка снимка будет иметь своё уникальное значение ошибки определения высоты.

При интерферометрической обработке снимков формула оценки точности имеет вид [5]

$$m_H = R \sin \theta \frac{\lambda}{4\pi B \cos(\alpha - \theta)} m_\varphi, \quad (8)$$

где R – наклонная дальность до элемента изображения;
 θ – угол луча обзора с местной вертикалью;
 λ – длина волны радиолокатора;
 B – база интерферометра (расстояние между траекториями носителя);
 α – угол между базой и горизонтальной плоскостью;
 m_φ – СКО измерения фазы.

СКО измерения фазы вычисляется по формуле [5]

$$m_\varphi = \frac{\pi^2}{3} (1 - \gamma)^{0.86},$$

где γ – коэффициент интерферометрической когерентности.

Когерентность является критерием качества парных радиолокационных изображений, она характеризует, насколько изображения коррелируют друг с другом. Коэффициенты когерентности двух изображений уникальны для каждой совмещенной пары пикселей снимков, а это значит, что для любого участка снимка возможно выполнить оценку точности высотного положения.

Таким образом, объективная оценка точности определения высот по результатам фотограмметрической и интерферометрической обработки снимков может быть осуществлена для любого пикета на стерео- или интерферометрическом построении. Поэтому совместная обработка фотограмметрической и интерферометрической ЦМР по методу наименьших квадратов может быть выполнена максимально эффективно.

Актуальность рассмотрения вопроса приведения нерегулярно расположенных значений высот в узлы регулярной сетки, называемого также гриддингом (от англ. Grid – сетка), обусловлена тем, что алгоритмы интерполяции, реализованные в программных продуктах, выполняют задачу гриддинга с неодинаковым качеством, а излишнее закругление значений высот при интерполяции недопустимо.

Экспериментальное сравнение основных алгоритмов интерполяции (средневзвешенная интерполяция, метод аналитических сплайнов, а также метод среднего квадратического прогноза с использованием марковских моделей III и IV порядка) при создании ЦМР выполнено в [19]. Сделан вывод, что для решения целевой задачи наиболее приемлемы методы аналитических сплайнов и среднего квадратического прогноза. Поэтому в программных продуктах фотограмметрической и интерферометрической обработки космических снимков целесообразно реализовать именно эти алгоритмы интерполяции.

Следующим вопросом, требующим рассмотрения, является порядок уравнивания ЦМР, полученных в результате фотограмметрической и интерферометрической обработки соответствующих типов снимков.

Этап 4. Уравнивание ЦМР, полученных в результате обработки материалов оптико-электронной стереосъемки и радиолокационной интерферометрии. Оно является основой предлагаемого метода. В случае использования высотных данных, полученных двумя различными методами в одних и тех же точках земной поверхности, возникает неоднозначность искомых величин, что приводит к задаче уравнивания высот таких точек.

Уравнивание фотограмметрических и интерферометрических ЦМР предлагается выполнять по методу наименьших квадратов, который подробно описан в [16]. В качестве определяемых параметров $T_{1...k}$ принимаются высоты точек местности $H_{1...k}$, число которых равняется k . Уравниваемыми величинами будут являться высоты одноимённых точек, определенных методами оптико-электронной стереосъемки $H_{1...k}^I$ и радиолокационной интерферометрии $H_{1...k}^{II}$. Порядок уравнивания ЦМР описан в [20].

Уравнивание ЦМР по методу наименьших квадратов основано на минимизации квадратичной формы $\nu^T P \nu$. Поэтому определяющее значение для оптимального использования данного метода имеет правильное установление системы весов. Понятно, что веса обратно пропорциональны квадрату СКО, следовательно, задача установления системы весов сводится к поиску наиболее адекватных действительности алгоритмов оценивания точности исходных материалов оптико-электронной стереосъемки и радиолокационной интерферометрии.

Установление весовой матрицы P может осуществляться на основе двух подходов. Первый подход основывается на использовании ковариационных матриц K^I и K^{II} ошибок уравниваемых величин $H_{1...k}^I$ и $H_{1...k}^{II}$ [16]. Поскольку уравниваемые величины получены разными методами независимо друг от друга, то взаимная корреляция их ошибок отсутствует. В результате весовая матрица уравниваемых высот для первого подхода будет иметь следующий вид:

$$P = \begin{bmatrix} K^{I^{-1}} & 0 \\ 0 & K^{II^{-1}} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

Установление весов на основе ковариационных матриц ошибок фотограмметрической и интерферометрической обработки не лишено недостатков, так как получаемые по формулам

(7) и (8) ошибки являются косвенными, вследствие того, что погрешности определения высот лишь моделируются на основе съемочных параметров и расположения точек на снимке.

Альтернативой данному подходу может быть установление системы весов на основании фактических ошибок. Под фактическими ошибками будем понимать разности высот, полученных по съемочным материалам, и высот, определенных принципиально иным методом и с более высокой точностью. На первый взгляд реализация такого подхода на недоступной территории фактически неосуществима.

Однако в случае установки на КА лазерного высотомера, лучшие образцы которых позволяют измерять высоту с точностью на уровне единиц дециметров при плотности точек лазерного отражения в 5–10 м, такой подход будет оправдан.

Кроме того, данный подход может быть реализован, исходя из вполне обоснованного предположения, что параметры космической съемки, вследствие ее глобальности, сохраняются на различных территориях. А значит, воспроизведя такие условия съемки недоступной территории, как параметры орбит, тип рельефа, подстилающей поверхности и т.д. на тестовых участках, созданных на доступной для наземной съемки территории, становится возможным экстраполировать ошибки определения высот для тех или иных параметров съемки с доступной территории на недоступную.

Вследствие всего вышеизложенного, весовая матрица для второго подхода будет иметь вид

$$P = \begin{vmatrix} P^I & \\ & P^{II} \end{vmatrix}. \quad (10)$$

Здесь P^I , P^{II} – весовые матрицы для ЦМР, полученных фотограмметрическими и интерферометрическими методами соответственно, диагональные элементы которых имеют вид $1/m_k^2$, где m_k – значение СКО, типичное для k -й точки местности.

Простейшая классификация ошибок m_k может быть выполнена по степени пересеченности рельефа и типам подстилающей поверхности (леса, степи, пустыни, снежный покров, водоемы, городская застройка и т. п.). Для установления типовых значений ошибок, характерных для различных форм рельефа и типов подстилающей поверхности, необходимо провести исследования по оцениванию точности разнородных материалов космической съемки на различных тестовых участках, основные требования к которым сформулированы ниже.

Этап 5. Преобразование результирующей ЦМР в систему нормальных высот. Оно является заключительным этапом создания ЦМР. Процесс преобразования ЦМР из системы геодезических H в систему нормальных высот H^v сам по себе достаточно тривиален и заключается в удалении аномальной части ζ из геодезических высот уравненной ЦМР. Переход от одной системы высот к другой осуществляется в соответствии с формулой

$$H^v = H - \zeta.$$

То есть в каждом узле сетки ЦМР в системе геодезических высот выполняется вычитание соответствующих значений высот квазигеоида, которые определяются по цифровой модели аномалий высот. Цифровые модели аномалий высот создаются, подобно ЦМР, в виде регулярной сетки, с дискретностью до 1 угловой минуты ($\approx 1,8$ км). Таким образом, модели аномалий высот представляют собой упорядоченную совокупность значений высот квазигеоида (геоида), которые являются одним из параметров геопотенциала и вычисляются с помощью моделей ГПЗ. Качество моделей ГПЗ определяется степенью n разложения геопотенциала в ряд по сферическим функциям.

В настоящее время самыми современными зарубежными общепланетарными ультравысокостепенными моделями ГПЗ являются EGM2008, EIGEN-6C4, GECO, XGM2019e-2159. В табл. 5 представлены характеристики перечисленных моделей: название модели; год создания; страна, выпустившая модель; максимальная степень разложения потенциала силы при-

тяжения Земли в ряд по сферическим функциям, n ; тип исходной измерительной информация (S – спутниковые данные траекторного слежения, G – гравиметрия, A – альтиметрические измерения, при наличии – априорная модель ГПЗ).

Таблица 5

Основные характеристики современных общепланетарных ультравысокостепенных моделей гравитационного поля Земли

№ п/п	Название модели	Год создания	Страна	Степень n	Тип модели
1	EGM2008	2008	США	2190	S,G,A
2	EIGEN-6C4	2014	Германия, Франция	2190	S(Lageos, Grace,Goce), G,A
3	GECO	2015	Италия	2190	EGM2008, S(Goce)
4	XGM2019e-2159	2019	США	2159	S,G,A

Экспериментальное сравнение перечисленных моделей ГПЗ применительно к аномалиям высот позволило сделать вывод о том, что точность этих моделей находится на уровне 0,5 м.

Для решения задачи преобразования ЦМР из системы геодезических в систему нормальных высот на весь земной шар должна быть создана матричная карта высот квазигеоида по одной из моделей ГПЗ в формате .MTW. Формат .MTW является форматом матричных карт, который используется в программных продуктах «PHOTOMOD» и «ГИС Панорама».

Само преобразование ЦМР в систему нормальных высот целесообразно осуществлять в программном продукте «ГИС Панорама» путем вычитания из матрицы уравненных геодезических высот матрицы высот квазигеоида.

Рассмотрев порядок редуцирования ЦМР в систему нормальных высот, необходимо решить задачу оценки точности ЦМР.

Этап 6. Оценка точности полученных результатов. Она является завершающим этапом предлагаемого метода. Рассматривая процесс оценки точности применительно к разрабатываемому методу построения ЦМР, необходимо сначала сформулировать требования к эталонному полигону для оценки точности ЦМР, а затем описать порядок оценки точности ЦМР на эталонном полигоне.

Оценка точности ЦМР, созданных методами космической оптико-электронной стереосъемки и радиолокационной интерферометрии, должна выполняться относительно значений высот, которые найдены альтернативными методами и с более высокой точностью. Точность эталонных значений высот должна быть на порядок выше точности оцениваемых ЦМР, т. е. СКО эталонных значений высот должны быть в пределах 0,3–0,5 м. Значения эталонных высот могут быть представлены как в виде точечных объектов, так и в виде эталонных моделей рельефа.

Таким образом, тестовый участок должен позволять оценивать точность ЦМР как относительно точечных объектов, разнесенных в пространстве, так и относительно эталонного площадного участка, имеющего максимально возможные размеры. Тестовых участков должно быть несколько, они должны представлять все возможные формы рельефа и типы подстилающей поверхности. Целесообразно, чтобы каждый тип рельефа был представлен тремя пространственно разнесенными тестовыми участками. Поэтому общее количество тестовых участков должно быть не менее 15. Проект тестового участка представлен на рис. 2.

Тестовый участок представляет собой территорию размером 50 × 50 км. Внутри этого квадрата квазиравномерно располагаются эталонные точечные пункты, количество которых должно быть около 100. Также необходимо предусмотреть наличие 5–7 исходных пунктов, которые будут воспроизводить исходные пункты на недоступной территории (линии уреза воды крупных водоемов, пункты космической геодезической сети или сети референционных станций и т. п.). Допускается совмещение эталонных и исходных пунктов. В пределах тестового

вого участка создается эталонная модель рельефа размером $5-10 \times 5-10$ км с дискретностью, равной 1-2 м. Эталонные точечные пункты могут быть определены относительным методом космической геодезии, а могут быть выбраны по результатам камеральной оценки исходной геодезической основы на предмет ее соответствия требованиям к точности (0,3–0,5 м), а также на предмет дешифрируемости пунктов на космических снимках. Эталонные модели рельефа наиболее целесообразно создавать методом воздушного лазерного сканирования. Система координат для эталонных значений – СК-42, система высот – геодезическая и Балтийская.

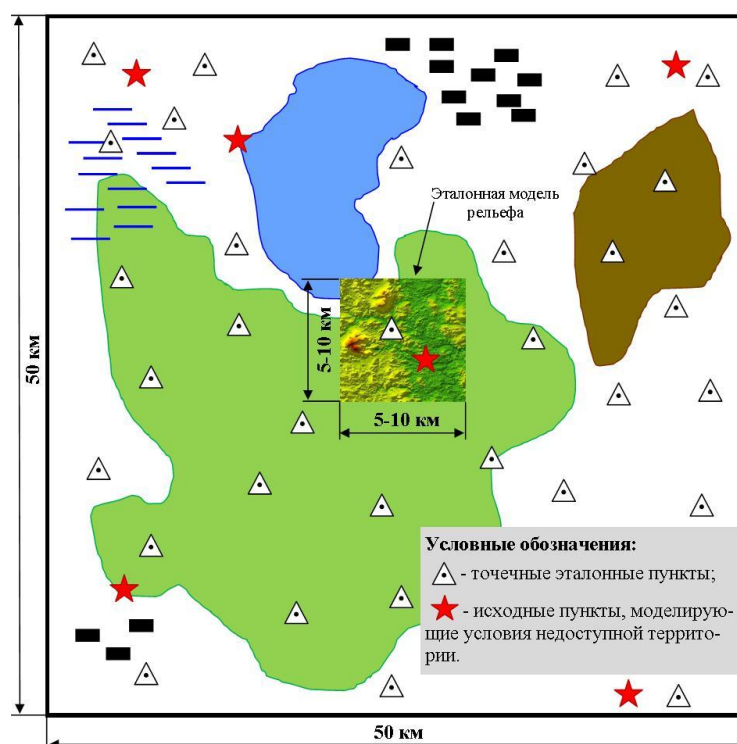


Рис. 2. Проект тестового участка

В общем тестовые участки должны воспроизводить все возможные условия космической съемки над доступной территорией, в которых может быть реализована съемка недоступной территории. Совокупность всех тестовых участков будем называть эталонным полигоном для оценки точности ЦМР, создаваемых по материалам космической съемки.

Точность ЦМР m на тестовом участке должна оцениваться по формуле вычисления СКО [16]

$$m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_i^{\text{ЦМР}} - H_i)^2}{n}}. \quad (11)$$

Здесь $H_i^{\text{ЦМР}}$ – высота i -го пункта, полученная по ЦМР;

H_i – эталонное значение высоты i -го пункта;

n – число пунктов, участвующих в оценке точности.

В случае оценки точности ЦМР по эталонным пунктам в точках модели, соответствующих плановому положению эталонных пунктов, определяется значение высоты по ЦМР и выполняются вычисления по формуле (11).

В случае оценки точности ЦМР по эталонным моделям рельефа в программном продукте «ГИС Панорама» выполняется вычитание из матрицы высот исследуемой ЦМР матрицы высот эталонной ЦМР. Получившаяся матрица расхождений, имеющая вид $(H_i^{\text{ЦМР}} - H_i)$, перево-

дится в текстовый формат, после чего выполняется обработка массивов расхождений по формуле (11).

Отчет об оценке точности ЦМР на тестовом участке должен содержать сведения о максимальных и минимальных расхождениях высот, гистограммах распределения расхождений высот и значениях СКО отдельно для точечного и для площадного случаев оценки точности ЦМР. Понятно, что оценку точности ЦМР необходимо выполнять на максимально возможном количестве тестовых участков эталонного полигона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный метод построения ЦМР предназначен для достижения требуемой точности определения нормальных высот рельефа на недоступной территории.

Особенности данного метода заключаются в следующем:

- районировании рельефа на основе анализа его статистических характеристик;
- обосновании возможности применения точек пространственной фототриангуляции в качестве опорных пунктов при интерферометрической обработке радиолокационных изображений;
- разработке способа уравнивания ЦМР, полученных в результате обработки материалов оптико-электронной стереосъемки и радиолокационной интерферометрии, на основе математического аппарата метода наименьших квадратов.

Заметим, что данный метод применим также для уравнивания двух и более ЦМР сопоставимой точности, полученных со средств ДЗЗ космического и/или воздушного базирования, с произвольным сочетанием методов съемки (оптико-электронная стереосъемка, радиолокационная интерферометрия, воздушное лазерное сканирование). Допустимая разность в точности исходных ЦМР может быть вычислена по формуле (6).

Практическая проверка разработанных теоретических положений выполнена в ходе экспериментов, описанных в [20, 21]. Повышение точности построения ЦМР предлагаемым методом составило в среднем 10%. Таким образом, разработанный метод может применяться для построения ЦМР на недоступных территориях. Важным достоинством метода является повышение достоверности получаемого результата за счет привлечения альтернативных съемочных данных сопоставимой точности.

Список используемых источников

1. Данные космической съемки: официальный сайт компании «Совзонд». – URL: <https://sovzond.ru/products/spatial-data/satellites> (дата обращения: 07.07.2021).
2. *Оньков И. В.* Оценка точности ЦМР, созданных по стереопарам триплета КА ТН-1 в программном комплексе ENVI // Геоматика. – 2014. – № 3. – С. 22–27.
3. *Оньков И. В.* Оценка точности построения ЦМР методом радарной интерферометрии по снимкам ALOS/PALSAR // Геоматика. – 2012. – № 3. – С. 35–41.
4. *Пешкун А. А.* Создание трехмерных моделей местности с использованием материалов съемки космического аппарата типа «Ресурс-П» // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2016. – Т. 3, № 1. – С. 28–33.
5. *Захарова Л. Н.* Методы радиолокационной интерферометрии в исследовании характеристик земных покровов: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Фрязино, 2011. – 213 с.
6. *Жарова Н. Э.* Разработка методики формирования «случайных» стереопар космических изображений с целью создания цифровых моделей рельефа и местности: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2017. – 142 с.

7. *Блохинов Ю. Б.* Разработка методов автоматизации фотограмметрических процессов на основе алгоритмов анализа и обработки изображений: дис. ... докт. техн. наук. – М., 2011. – 301 с.
8. *Ушенкин В. А.* Алгоритм высокоточной обработки интерферометрической информации от систем дистанционного зондирования Земли на основе 3D-анализа наблюдаемой сцены: дис. ... канд. техн. наук. – Рязань, 2017. – 165 с.
9. *Сосновский А. В.* Интерферометрическая обработка данных космических радиолокаторов с синтезированной апертурой при создании цифровых моделей рельефа земной поверхности: состояние и проблемы // *Ural Radio Engineering Journal*. – 2020. – № 4(2). – С. 198–233.
10. *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.
11. *Нейман Ю. М.* Расчет проекта дискретизации аномалии силы тяжести в ближней зоне при высокоточных определениях высот квазигеоида и уклонений отвеса // *Сборник трудов МГУГиК*. – 1991. – С. 82–95.
12. *Алексеев В. Ф.* Оперативный мониторинг гравитационного поля Земли в сейсмически опасных и тектонически активных районах: моногр. – СПб.: БГТУ, 2009. – 106 с.
13. *Литинский Е. И., Астапович А. В.* Обоснование области расположения свободной станции электронного тахеометра для съемки ситуации и рельефа участков коррекции системы наземной навигации подвижных объектов // *Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского*. – 2019. – Вып. 668. – С. 129–136.
14. Методика расчета допустимого шага дискретизации цифровой модели рельефа в зависимости от степени пересеченности местности / В. Ф. Алексеев [и др.] // *Труды Института прикладной астрономии РАН*. – 2021. – Вып. 57. – С. 41–47.
15. *Хрущ Р. М.* Фотограмметрия: учебник. – СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2011. – 541 с.
16. *Большаков В. Д., Гайдаев П. А.* Теория математической обработки геодезических измерений. – М.: Недра, 1977. – 367 с.
17. Расчет необходимой точности измерений в системе полигонометрических ходов / А. В. Астапович [и др.] // *Геодезия и картография*. – 2016. – № 9. – С. 10–12.
18. *Лобанов А. Н.* Фотограмметрия. – М.: Недра, 1984. – 552 с.
19. *Алексеев В. Ф., Андриевская В. Ю., Жбанов К. К.* Применение среднего квадратического прогноза при создании и использовании цифровых моделей рельефа // *Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского*. – 2021. – Вып. 676. – С. 84–88.
20. Модель рельефа недоступной территории, построенная по результатам комплексирования разнородной спутниковой информации / А. В. Астапович [и др.] // *Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского*. – 2021. – Вып. 677. – С. 75–83.
21. Методика определения нормальных высот рельефа путем совместной обработки космической съемочной информации и данных об опорных пунктах / В. Ф. Алексеев [и др.] // *Информация и космос*. – 2022. – Вып. 1. – С. 115–124.

Д. Н. Бирюков,
доктор технических наук;
Г. А. Бодунов;
А. С. Дудкин,
кандидат технических наук;
В. В. Тельбух

ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТЕМАТИЧЕСКОЙ БЛИЗОСТИ ТЕКСТОВ

В статье рассматриваются различные виды алгоритмов преобразования текстового корпуса. Кроме того, представлены описания алгоритмов кластеризации текста, анализ и сравнение различных комбинаций алгоритмов, из которых выбирается лучшее сочетание на основе результатов тестирования.

Ключевые слова: кластеризация текстовых документов, модель «мешок слов», статистические модели, извлечение терминологии, тематическое моделирование, векторное представление документов, машинное обучение.

ВВЕДЕНИЕ

Современный этап развития сетевых технологий привел к значительному увеличению текстовых данных, публикуемых на различных информационных и развлекательных ресурсах сети Интернет, подавляющая часть которых представлена на естественном языке в неструктурированном виде, что затрудняет их автоматизированную обработку. На наш взгляд, одним из основных направлений решения проблемы является комбинирование методов и алгоритмов для обработки различных текстовых данных.

В автоматизированной обработке неструктурированных текстов продолжает сохранять актуальность задача установления их тематической близости, подразумевающая кластеризацию и классификацию текстов. **Кластеризация** – это одна из самых часто решаемых задач машинного обучения, позволяющая разбивать множества объектов на группы по схожим признакам. Кластеризация играет важную роль в разных областях науки: медицина, экономика, биология, а также в решении ряда задач, связанных с обработкой естественного языка. Задача текстовой кластеризации имеет много общего с задачей классификации, но имеет и ряд своих особенностей: в основании алгоритмов классификации лежит уже точное знание о принадлежности того или иного объекта к данному классу, тогда как в рамках кластеризации необходимо формировать кластеры.

Современные методы позволяют объективно и достоверно оценивать точность моделей классификации с помощью задаваемых метрик (*accuracy*, *precision*, *recall* и т. д.), в то время как оценка получаемых кластеров основывается на экспертном мнении и ее непросто выразить в виде какой-то численной характеристики [1]. Главной характеристикой получаемых кластеров является их семантическая близость, вычисляемая путем векторного представления полученных текстов. Также особенностью можно считать отнесение одного объекта данных к нескольким кластерам одновременно, что является довольно важным в решении задачи установления тематической близости новостей. Кратко сформулированные особенности практической декомпозиции кластеризации, применяемой к большим объемам текстовых данных, можно описать через совокупность требований:

– найденные кластеры должны быть интерпретируемы в рамках содержания текстовых данных;

- полученная модель может быть применена не только к частичной выборке, но и генеральной совокупности текстов;
- определение принадлежности объектов к разным кластерам;
- низкая ресурсозатратность алгоритма и быстрая скорость работы;
- минимальное вмешательство и настройка со стороны пользователя.

Решение задачи определения тематической близости текстов предполагает выполнение пяти основных этапов:

1. Сбор данных.
2. Обработка и приведение к нормальной форме.
3. Анализ алгоритмов векторизации текста.
4. Кластеризация текстовых представлений в векторном пространстве.
5. Оценка полученных результатов на основе метрик качества.

Перейдем к рассмотрению первого этапа.

Этап 1. Сбор данных.

Для формирования экспериментального датасета был осуществлен сбор текстовых данных из открытых источников средств массовой информации в сети Интернет (*Meduza*, *Lenta.ru*, «Коммерсант» и др.). Всего можно выделить 26 основных тем, в которых отслеживается тематическое подобие. Например: Политика, Наука, Медицина... Полученные данные формируют датасет размером 202421 строки и 7 столбцов (2.6 Гб), представленный в табличной форме на рис. 1.

	title	article	keywords	authors	rubrics	date	count_comment
0	Неудачный обгон на Зеленогорском шоссе унёс жи...	В ночь на 5 января в лобовом столкновении в ...	неудачный,обгон,зеленогорский,шоссе,унести,жиз...	Пруссакова Яна	Происшествия	2020-05-01 10:01:00	2.0
1	Путин отмечает Рождество в Петербурге. Второй ...	Владимир Путин третий год подряд встречает Р...	путин,отмечать,рождество,петербург,втора,год,п...	Елисеев Алексей	Власть	2020-07-01 00:02:00	NaN
2	На Петроградской стороне на 200 квадратах горе...	Два пожара тушили в первое утро года на Петр...	петроградский,сторона,квadrat,кровля,сосед,усн...	Коренькова Анастасия	Происшествия	2020-01-01 10:04:00	0.0
3	Вождь преткновения.	Сейчас на рассмотрении в комитете по охране па...	вождь,преткновение,фото,Новости,Санкт-Петербург	Грачев Михаил	Город	2020-01-31 12:23:00	15.0
4	Самолет из Тюмени в Петербург совершил экстрен...	Самолет из Тюмени опаздывает в Петербург на ...	самолет,тюмень,петербург,совершить,экстренный...	Ципуштанова Татьяна, Елисеев Алексей	Происшествия	2020-04-01 10:04:00	0.0

Рис. 1. Экспериментальный датасет

Этап 2. Обработка данных.

Предварительная обработка текстовых данных является очень важным шагом при решении задачи формирования моделей NLP (*Natural Language Processing*, обработка естественного языка). Нормализуя текст на естественном языке, мы стремимся привести данные к более стандартному виду, для чего необходимо:

- привести все символы к единому регистру;
- очистить текст от числовых значений, используя регулярные выражения;
- удалить знаки пунктуации;
- удалить лишние пробельные символы и отступы;
- токенизировать текст для получения слов-компонент (зачастую реализуется при помощи регулярных выражений);
- удалить стоп-слова;
- выполнить стемминг;
- выполнить лемматизацию.

Рассмотрим некоторые важные понятия из этого списка этапов обработки текста.

Токенизация – процесс разделения предложений путем идентификации отдельных слов-компонент. К примеру, в английском и других языках, использующих ту или иную версию латинского алфавита, пробел или кавычки применяют как разделитель слов [3].

Стемминг – это процесс преобразования слова для приведения его в форму, содержащую только основу слова, т. е. в процессе обработки отрезается «лишнее» от корня слова. Главный недостаток подхода заключается в возможной потере содержания текста и его смысловых основ в ходе обработки.

Лемматизация – это процесс приведения слова к его канонической структуре. Ключевое отличие от стеммера заключается в том, что стеммер действует без знания контекста и, соответственно, не понимает разницу между словами, которые могут иметь разный смысл в зависимости от части речи. При этом стеммер имеет ряд преимуществ: скорость и легкость применения [2].

Все реализации из перечисленных средств первичной обработки текста можно найти в библиотеках *Scikit-learn* и *NLTK*, написанных на языке *Python*.

В результате обработки массива собранной информации был сформирован структурированный датасет текстовых данных, фрагмент которого представлен на рис. 2.

url	title	text	topic	tags	date	preprocessed	text_prep	text_stem	text_sw
https://lenta.ru/news/2000/05/14/georgia/	Шеварднадзе представил новый состав правительства	Президент Грузии Эдуард Шеварднадзе представил...	Мир	Все	2000/05/14	Президент Грузии Эдуард Шеварднадзе представил...	президент грузин эдуард шеварднадзе представил...	президент грузин эдуард шеварднадзе представил...	президент грузин эдуард шеварднадзе представил...
https://lenta.ru/news/2000/04/11/latvia/	Латвия меняет правила въезда российских граждан...	Латвийский МИД передал России проект новых пра...	Мир	Все	2000/04/11	Латвийский МИД передал России проект новых пра...	латвийский мид передал россия проект новых пра...	латвийский мид передал россия проект новых пра...	латвийский мид передал россия проект новых пра...
https://lenta.ru/news/2000/06/23/weapon/	На территории психбольницы производили оружие	В чешском городе Опава на территории психиатри...	Мир	Все	2000/06/23	В чешском городе Опава на территории психиатри...	в чешском городе опав на территории психиатри...	чешский город опав территор психиатрическ больниц...	чешском городе опав территор психиатрическо...
https://lenta.ru/news/1999/09/23/mars/	NASA потеряло связь с марсианским зондом	Возможно, Национальное аэрокосмическое агентств...	Мир	Все	1999/09/23	Возможно Национальное аэрокосмическое агентств...	возможно национальное аэрокосмическое агентств...	возможн националн аэрокосмическ агентств сша ...	возможно национальное аэрокосмическое агентств...
https://lenta.ru/news/2000/04/03/olympic_games/	Австралийские аборигены грозят сорвать Олимпий...	Лидеры аборигенов грозят начать в сентябре, ко...	Мир	Все	2000/04/03	Лидеры аборигенов грозят начать в сентябре ког...	лидеры аборигенов грозят начать в сентябре ког...	лидер абориген гроз нача сентябрь сидн откроют ...	лидеры аборигенов грозят начать сентябрь сидн...
https://lenta.ru/news/2000/03/03/moldavia/	"Газпром" возобновил поставки газа в Молдавию	Российский газ снова стал поступать в Молдавию...	Экономика	Все	2000/03/03	Российский газ снова стал поступать в Молдавию...	российский газ снова стал поступать в молдавию...	российский газ снова стал поступа молдав сообщили...	российский газ снова стал поступать молдавию с...
https://lenta.ru/news/1999/10/27/petrol/	Потребление бензина в Москве сократилось	Существенно снизилось в октябре потребление бе...	Экономика	Все	1999/10/27	Существенно снизилось в октябре потребление бе...	существенно снизилось в октябре потребление бе...	существенн сниз октябрь потреблен бензин москв р...	существенно снизилос октябрь потребление бенз...
https://lenta.ru/news/2000/05/18/cb/	В Госдуму поступил отчет Центробанка за 1999 год	В четверг в бюджетный комитет Госдумы поступил...	Экономика	Все	2000/05/18	В четверг в бюджетный комитет Госдумы поступил...	в четверг в бюджетный комитет госдумы поступил...	четверг бюджетн комитет госдум поступ отчет де...	четверг бюджетный комитет госдум поступил отч...
https://lenta.ru/news/1999/10/26/us_buildings/	США хотят получить пять московских зданий за д...	Соединенные Штаты предлагают российской сторон...	Экономика	Все	1999/10/26	Соединенные Штаты предлагают российской сторон...	соединенные штаты предлагают российской сторон...	соединенн штат предлага российск сторон переда ...	соединенный штат предлагают российскою сторон...

Рис. 2. Датасет, приведенный к нормальной форме

Этап 3. Анализ алгоритмов векторизации текста.

На данном этапе проведен теоретический анализ подхода к выбору алгоритма векторизации текстовой информации. Существует множество алгоритмов перевода текстовой информации в понятный для ЭВМ вид, но рассмотреть каждый из них подробно невозможно в одной статье, поэтому далее рассматриваются наиболее эффективные и часто используемые их реализации.

Алгоритмы перевода естественного языка в формат, с которым можно производить вычисления, подразделяются на числовые и нечисловые [4]. К *числовым алгоритмам* относятся те алгоритмы, которые используют статистические методы или числовые характеристики (например, TF-IDF, матрицу близости документов), т. е. переводят естественный язык в векторную форму. *Нечисловые* – это алгоритмы, которые используют лингвистические признаки, слова или фразы. К нечисловым методам относится STC. Кроме того, *Suffix Tree Clustering*, кластеры которого образуются в узлах в виде суффиксного дерева, строящееся из слов входных документов. Также в некоторых работах можно увидеть использование построения графовых деревьев, в листьях которого содержатся искомые кластеры (связи между

текстами – морфологический разбор). В некоторых обзорах отдельно выделяются методы кластеризации текста, основанные на семантической близости (*WordNet*). Также к этой группе можно отнести алгоритмы, использующие латентное семантическое индексирование, хотя обычно они считаются методами тематического моделирования [5]. В рамках исследования будут рассматриваться алгоритмы векторного представления текстовых данных.

Модель «мешок слов» – CBOW методы – является наиболее простым в реализации алгоритмом представления текстов в векторном пространстве. Формирование вектора слова осуществляется исходя из всех встречающихся n -gram в текстовом документе, которые образуются в соответствии с длиной окна n . Одной из разновидностей BOW методов является CBOW – «непрерывный мешок со словами». Этот метод формирует кортеж на основе n -граммы текстового документе, в котором каждое слово имеет свои id и разметку вхождений в него. В результате такого подхода к обработке текстовых данных формируются признаки, показывающие, сколько раз соответствующая n -грамма фигурирует в документе [6]. Однако в описанном подходе (TF-IDF) существует значительная проблема, связанная с размерностью векторного представления слов на больших объемах данных. Это происходит потому, что каждое слово в словаре представляется как one-hot encoding вектор размерностью, равной объему всех уникальных слов корпуса. Это приводит к использованию больших объемов памяти и долгому времени обучения алгоритма. При этом CBOW использует разреженные векторы, поэтому не имеет вышеуказанных проблем.

Метод Skip-gram – метод обучения машинного обучения без учителя, который применяется для определения тематической близости (связанности) слов [7]. Алгоритм обучения полностью противоположен CBOW: главным признаком является само слово в заданном контексте. На выходе алгоритма выводится контекст поданного семпла, в отличие от CBOW, у которого на выходе получаем слово, исходя из контекста. Метод скип-грамм реализуется в модели word2vec, что позволяет представить вектор в n -мерном пространстве (или n -мерном пространстве признаков) из соединения слов, приближенных друг к другу. Цель обучения алгоритма состоит в нахождении весовой функции скрытого слоя нейросети, которая по своей сути и является «векторами слов». Необходимо обучить нейронную сеть делать следующее: учитывая определенное слово в середине предложения (входное слово), посмотреть на слова рядом. Сеть сообщит нам вероятность того, что каждое слово в нашем словаре окажется «ближайшим словом», которое мы выбрали.

Вероятности вывода будут зависеть от того, насколько вероятно найти каждое словарное слово рядом с нашим входным словом. В зависимости от подаваемых текстов будет формироваться весовая функция нейросети. После обучения нейросети ей можно подать определенное слово и получить выходную вероятность принадлежности слова к контексту, например, для слов «политическая» и «ситуация» вероятность вывода будет выше, чем у пары слов «бассейн» и «вертолет». Мы обучим нейронную сеть делать это, «скармливая» ей тексты, найденные в публикуемых новостях. На рис. 3 представлено различие двух реализаций алгоритмов в пакете *genism CBOW* и *Skip-gram*.

TF-IDF – это статистическая мера, отражающая значимость слова в тексте на основе коллекции используемых текстов. Такая мера формирует веса слов, исходя из показателей нахождения слова в тексте, обратно пропорционально частоте его вхождения во всех документах коллекции текстов. Сама аббревиатура указывает на это: TF – term frequency (частота слова), а IDF – inverse document frequency (обратная частота документа).

Наибольший вес получает та n -грамма, которая чаще всего используется в одном документе и не встречается в других, а значит, служит отличительным признаком одного текста от другого. Данный метод используется в решении задач, связанных с определением тематического подобия текста и информационного поиска. Признаки документов в этом подходе представляют собой произведение двух величин, частоты n -граммы и обратной частоты документа [9]. Способ его подсчета представлен ниже.

Term frequency:

$$tf(t, d) = \frac{n_t}{\sum n_k}. \quad (1)$$

Inverse document frequency:

$$idf(t, D) = \log \frac{|D|}{|\{d_i \in D | t \in d_i\}|}. \quad (2)$$

Term frequency–inverse document frequency:

$$tf \cdot idf = (t, d, D) = tf(t, d) \times idf(t, D). \quad (3)$$

Здесь введены следующие обозначения: n_t – число вхождений слова t в документ, n_k – общее число слов. Кроме того, $|D|$ – число документов, $|\{d_i \in D | t \in d_i\}|$ – число документов, в которых встречается t .

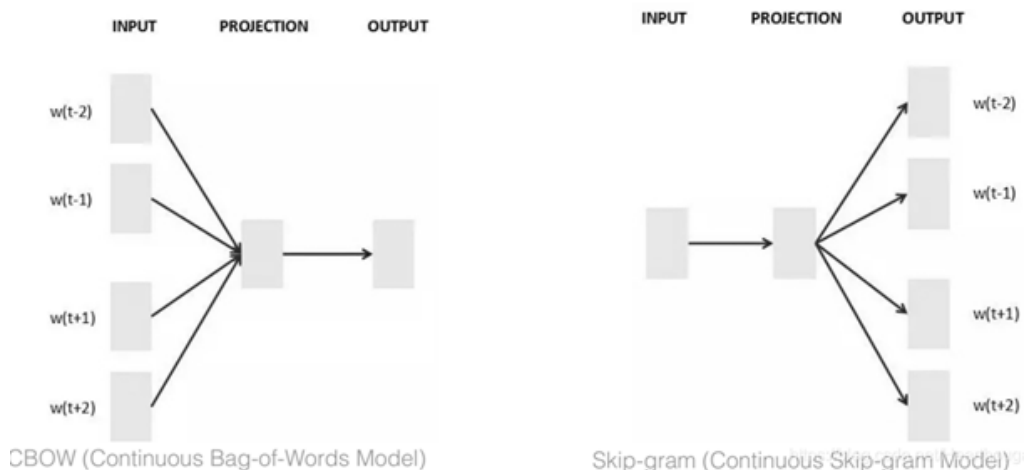


Рис. 3. Различия алгоритмов Skip-gram и CBOW

Тематические модели. Классически рассматриваемым методом тематического моделирования является Латентное размещение Дирихле (LDA). LDA – это генеративная вероятностная модель, предполагающая, что каждая тема представляет собой группу связанных по смыслу слов, которые представлены в документе, а сам документ является набором вероятностей по каждой теме. Данный метод тематического моделирования был предложен Дэвидом Блеем, Эндрю Ыном и Майклом Джорданом в 2003 году. Терминами могут быть как отдельные слова, так и словосочетания, которые можно представить в виде n -gram матриц.

Особенность данного подхода заключается в том, что слова, принадлежащие к разным темам, могут пересекаться в разных текстах, что дает нечеткость в определении темы, а это, в свою очередь, является главной задачей в понимании тематики, исходя из гибкости языка. Данный метод устраняет несколько недостатков pLSA (*Probabilistic Latent Semantic Analysis*, вероятностная тематическая модель), в котором наблюдается линейное увеличение количества параметров в зависимости от размера обучающей выборки.

Этап 4. Кластеризация.

После получения векторных представлений текстовой информации можно перейти к кластеризации. На данном этапе рассмотрены основные принципы работы алгоритмов кластеризации и оценки их показателей качества.

Рассмотрим *K-means* и *KMinibatch*. Работа алгоритма *k-means* и *KMinibatch* заключается в разбиении множества элементов векторного пространства на заранее известное число кластеров k . Алгоритм стремится минимизировать «расстояние» каждой точки, принадлежащей к кластеру. На каждой итерации алгоритма вычисляется новый центр масс скопления точек, и переопределяются кластеры с новым полученным центром масс, исходя из используемой метрики (в нашем случае – евклидова). Алгоритм прекращает свою работу, когда изменения в кластерах становятся незначительными. Основное отличие *KMinibatch* от *Kmeans* заключается в разбиении всей выборки на отдельные части случайным образом, на которых начинается процесс обучения. Процесс обучения значительно сокращается за счет уменьшения объема вычислений, необходимых для сходимости к локальному решению.

DBSCAN (*Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise*) – алгоритм, основанный на гипотезе, что каждый кластер представляет собой плотные группы точек. Идея состоит в том, что, если определенная точка принадлежит кластеру, она должна находиться рядом со множеством других точек в этом кластере. На начальном этапе выбираются два параметра – расстояние между точками (ϵ) и минимальное количество точек для образования кластера (*MinPoints*). Затем выбирается произвольная точка в нашем наборе данных. Если в пределах расстояния ϵ от этой точки находится большее количество точек с *MinPoints* (включая саму исходную точку), то считаем, что точка является частью «кластера».

Далее происходит расширение кластера, проверяются все новые точки и сравниваются: есть ли у них больше «соседей» с минимальными точками на расстоянии от ϵ . При этом рекурсивно увеличивают кластер, что в итоге приводит к отсутствию точки для добавления в кластер. Затем мы выбираем новую произвольную точку и повторяем процесс. Теперь вполне возможно, что выбранная нами точка имеет меньше точек *MinPoints* в своем ϵ радиусе, а также не является частью какого-либо другого кластера. Если это так, то точка считается «точкой шума», не принадлежащей ни к одному кластеру. Недостаток DBSCAN заключается в следующем: при постоянном перезапуске алгоритма пограничные точки могут переопределяться или относиться к шумам, поэтому работа данного алгоритма имеет очень высокую чувствительность к подборам параметров.

Иерархическая кластеризация. Иерархическая кластеризация – это большое семейство алгоритмов кластеризации, которые создают вложенные кластеры путем их последовательного объединения или разделения [14]. В работе использовался *Agglomerative Clustering*. Этот вид кластеризации применяет подход «снизу-вверх»: каждое наблюдение начинается в своем собственном кластере. Алгоритм начинает свою работу с того, что каждому множеству точек присваивается свой кластер, их количество равно количеству точек. Далее происходит соединение наиболее близких по расстоянию точек (в данной работе расстояние рассчитывалось метрикой *Average linkage* – среднее расстояние между парными точками из двух кластеров). Этот процесс происходит итеративно, пока не осуществится объединение в один кластер. Исходя из дерева разбиений, мы можем остановить итерирование алгоритма на нужном количестве кластеров.

Описание метрик качества кластеризации. Задача оценки полученных кластеров является более трудной по сравнению с результатами классификации по причине отсутствия знания об истинных или приближенных метках объектов. Выделяют два типа оценки кластеризации – это внешние и внутренние. Внешние метрики высчитываются, когда имеется информация об истинной принадлежности объекта к кластеру, внутренние, в свою очередь, оценивают качество только исходя из полученных разбиений. Внутренние метрики позволяют определить оптимальное число кластеров. Основной упор был сделан на такие метрики, как *Silhouette*, *AMI*.

Далее для оценки работы алгоритмов рассмотрим основные внешние метрики.

ARI/AMI. Для использования данной метрики при оценке качества кластеризации нужно учитывать, что датасет обладает некоторыми метками принадлежности к классу. В нашем случае данная метка будет определяться названием темы, которой принадлежит выбранный

текст. Преимуществом такой меры является зависимость от разбиения выборки на кластеры. В приведенной ниже формуле будут введены следующие обозначения:

- a – число пар объектов, находящихся в одном кластере и имеющих одну метку;
- b – число пар объектов, имеющих различные метки и находящихся в разных кластерах;
- n – количество объектов.

Тогда RI будет выражать схожесть двух разных кластеризаций одной и той же выборки [15]. Формула, определяющая RI, будет иметь следующий вид:

$$RI = \frac{2(a+b)}{n(n-1)}. \quad (4)$$

Чтобы индекс RI выражал схожесть двух объектов в диапазоне [-1;1], его необходимо нормировать. В результате получаем меру ARI:

$$ARI = \frac{RI - E[RI]}{\max(RI) - E[RI]}, \quad (5)$$

где RI – предварительно вычисленный индекс Rand (индекс Рэнда);

E – ожидаемый индекс Rand.

Мера AMI очень похожа на вышеуказанную меру. Ее отличие заключается в вычислении дискретных распределений вероятностей отнесения к кластеру, т. е. вероятность отнесения к кластеру равна доле объектов в нем. Индекс MI измеряет долю информации, общую для обоих разбиений, и показывает, насколько информация об одном из них снижает неопределенность относительно другого. [15].

Силуэт. Метрика является внутренним критерием качества разбиения. Коэффициент измерения получается с помощью внутриклассового расстояния – a и среднего расстояния до ближайшего кластера – b . Тогда силуэт данного объекта вычисляется по выражению

$$s = \frac{b-a}{\max(a,b)}. \quad (6)$$

Силуэтом, в общем смысле, является показатель, определяющий, на сколько среднее расстояние от объектов одного кластера отличается от среднего расстояния до объектов других кластеров [15]. Данная величина лежит в диапазоне [-1,1].

Этап 5. Оценка полученных результатов исходя из метрик качества.

Результатом данной работы стало выявление наиболее эффективной комбинации алгоритма векторизации и кластеризации. В табл. 1–4, приведенных ниже, представлены результаты кластеризации в зависимости от применяемого векторизатора текстовых документов.

Таблица 1

Использование векторизатора Word2vec, реализованного в Skip-gram

Алгоритм	ARI	AMI	Homogeneity	Completeness	V-measure	Silhouette
K-means	0.6629	0.7279	0.75418	0.742972	0.739191	0.172097
	5	12				
DBSCAN	0.8640	0.8560	0.87416	0.879096	0.841663	0.168497
	03	85				
Hierarchical	0.7122	0.8278	0.81246	0.876367	0.852313	0.162195
	39	18				
MBKmeans	0.5751	0.4512	0.74891	0.686901	0.445857	0.115197
	74	49				

Таблица 2

Использование векторизатора Word2vec реализация CBOW

Алгоритм	ARI	AMI	Homogeneity	Completeness	V-measure	Silhouette
K-means	0.612 31	0.6423 31	0.62321	0.72352	0.532623	0.142565
DBSCAN	0.794 03	0.8268 0	0.78422	0.85121	0.68731	0.143144
Hierarchical	0.691 24	0.7321 2	0.66534	0.69234	0.64293	0.131245
MBKmeans	0.595 47	0.6001 3	0.45964	0.56405	0.42352	0.122448

Таблица 3

Использование TF-IDF Vectorizer

Алгоритм	ARI	AMI	Homogeneity	Completeness	V-measure	Silhouette
K-means	0.6102 62	0.6981 93	0.516192	0.654333	0.740767	0.121137
DBSCAN	0.7413 16	0.6325 51	0.497439	0.570730	0.6550631	0.136520
Hierarchical	0.7390 11	0.6191 30	0.527356	0.551686	0.640747	0.140189 9
MBKmeans	0.6710 56	0.6881 58	0.502199	0.546763	0.630923	0.121781

Таблица 4

Векторизатор id2word и LDA

Alpha/Beta parameters	Coherence
0.01/0.60	0.3512
0.3/0.60	0.4362
0.6/0.60	0.3795
0.9/0.60	0.3541
0.01/0.90	0.3255
0.3/0.90	0.3397
0.6/0.90	0.3213
0.9/0.90	0.3178

Гиперпараметры выбранных алгоритмов кластеризации были подобраны с помощью средства *GridsearchCV* библиотеки *Scikit-learn*. Обучение для подбора наилучших параметров проводилось на валидационной выборке.

Время работы используемых вариантов получения векторного представления и алгоритма кластеризации с использованием сформированного датасета представлено в табл. 5. Конфигурация используемой аппаратуры была следующей: AMD Ryzen 5 4600H (8/16 cpu), 32 GB RAM. В табл. 5 время приводится в минутах.

Таблица 5

Время работы сочетания алгоритмов

Алгоритм	TF-IDF	CBOW	Skip-gram	Id2word
Kmeans	27	24	36	-
DBSCAN	28	30	31	-
LDA	-	-	-	10
Hierarchical	24	21	25	-
MBKmeans	18	17	21	-
Суммарные значения метрик	97	92	113	10

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье рассмотрены и экспериментально исследованы алгоритмы векторизации текстовых данных с их последующей кластеризацией. Эксперимент включал в себя этапы предварительной обработки данных, получения векторного представления и кластеризации текстов. Результаты исследования показали, что самой эффективной комбинацией являются алгоритмы *Word2vec(Skip-gram)* и *DBSCAN*. Единственным недостатком данной комбинации, по сравнению с другими алгоритмами, является долгое время обучения.

Точность кластеризации во многом зависит от гиперпараметров выбранного алгоритма и объема обучающейся выборки. Подобранные параметры помогли увеличить точность кластеризации в среднем на 5–8%. В случае использования тематического моделирования наблюдается сравнительно низкая точность получения непересекающихся кластеров. Данные результаты могут быть использованы для улучшения построения рекомендательных систем или выявления наиболее близких тематически связанных объектов.

Список используемых источников

1. A neural probabilistic language model / Y. Bengio [et al.] // *Journal of Machine Learning Research*. – 2003. – № 3. – P. 1137–1155.
2. Collobert R. and Weston J. A unified architecture for natural language processing: deep neural networks with multitask learning // *Conference: Machine Learning, Proceedings of the Twenty-Fifth International Conference*. – Helsinki (Finland), 2008. – June 5–9. – P. 160–167.
3. Xavier G., Bordes A. and Bengio Y. Domain adaptation for large-scale sentiment classification: A deep learning approach // *ICML 11: Proceedings of the 28th International Conference on International Conference on Machine Learning*. – 2011. – P. 513–520.
4. Gutmann M. U, Hyvärinen A. Noise-contrastive estimation of unnormalized statistical models, with applications to natural image statistics // *Journal of Machine Learning Research*. – 2012. – № 13. – P. 307–361.
5. Rumelhart D., Hinton G., Williams R. Learning representations by backpropagating errors // *Nature*. – 1986. – № 323. – P. 533–536.
6. Turney Peter D., Pantel P. From frequency to meaning: Vector space models of semantics // *Journal of Artificial Intelligence Research*. – 2010. – № 37. – P. 141–188.
7. Turney Peter D. Distributional semantics beyond words: Supervised learning of analogy and paraphrase // *Transactions of the Association for Computational Linguistics*. – 2013. – P. 353–366.
8. Morin F., Bengio Y. Hierarchical probabilistic neural network language model // *International workshop on artificial intelligence and statistics*. – 2005. – P. 245–252.

9. *Turian J., Ratinov L., Bengio Y.* Word representations: a simple and general method for semi-supervised learning // The 48th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics. – 2010. – P. 384–394.
10. Extensions of recurrent neural network language model / T. Mikolov [et al.] // Speech and Signal Processing (ICASSP): IEEE International Conference. – 2011. – P. 5528–5531.
11. Strategies for Training Large Scale Neural Network Language Models / T. Mikolov [et al.] // Automatic Speech Recognition and Understanding. – 2011. – P. 68–76.
12. Efficient estimation of word representations in vector space / T. Mikolov [et al.] // ICLR Workshop. – 2013. – P. 57–67.
13. *Mnih A. and The Y.* Why a fast and simple algorithm for training neural probabilistic language models. – URL: <https://arxiv.org/abs/1206.6426> (дата обращения: 26.06.2022).
14. *Tomas M., Yih W., Zweig G.* Linguistic Regularities in Continuous Space Word Representations // NAACL HLT. – 2013. – P. 36–43.
15. Semantic Compositionality Through Recursive Matrix-Vector Spaces / R. Socher [et al.] // The 2012 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP). – 2012. – P. 29–32.

Д. В. Андрушкевич,
кандидат технических наук;
Д. Н. Бирюков,
доктор технических наук, доцент;
П. В. Тимашов

ПОДХОД К СНИЖЕНИЮ КОЛИЧЕСТВА КОМПЬЮТЕРНЫХ АТАК НА ОБЪЕКТЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ, ОСНОВАННЫЙ НА ПОДМЕНЕ ОТПЕЧАТКОВ ОПЕРАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Представлено описание апробации подхода по снижению доли компьютерных атак и, соответственно, и рисков, связанных с их успешным проведением. В основу рассматриваемого подхода положена идея по введению атакующего в заблуждение относительно того, какая операционная система установлена на потенциально атакуемом объекте информационной инфраструктуры.

Ключевые слова: компьютерная атака, операционная система, сетевой трафик, модификация сетевого трафика, информационная безопасность.

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с пунктом 3.6.1 ГОСТ Р 53114-2008, под обеспечением информационной безопасности организации подразумевается деятельность, направленная на устранение (нейтрализацию, парирование) внутренних и внешних угроз информационной безопасности организации или на минимизацию ущерба от возможной реализации таких угроз.

Основными источниками угроз информационным ресурсам являются:

- различные виды разведок иностранных государств, конкурентов или злоумышленников;
- недобросовестный персонал организации или инсайдеры;
- стихийные бедствия и иные чрезвычайные происшествия.

Исходя из содержания пункта 3.2.1 ГОСТ Р 53114-2008, можно сказать, что информационная безопасность организации как состояние защищенности интересов организации в условиях угроз достигается в информационной сфере путем обеспечения совокупности свойств информационной безопасности – конфиденциальности, целостности, доступности информационных активов и инфраструктуры организации.

Необходимо помнить, что в современном мире любая информационная инфраструктура постоянно находится под угрозой. Угроза успешного проведения атаки связана с огромным количеством уязвимостей не только в различных версиях программного обеспечения (ПО), но и в самих операционных системах (ОС), которые установлены на ЭВМ, находящихся непосредственно в рассматриваемом сегменте сети. Стоит также отметить, что под «различными версиями» ПО понимается не только наличие устаревших версий, требующих обновления, но и новых версий, в которых уязвимости могут быть пока не обнаружены либо обнаружены, но еще не обнародованы. Вышесказанное касается и обновлений безопасности ОС, которые всегда будут условно запаздывать, позволяя определенное время эксплуатировать найденные уязвимости.

Основные направления поддержания состояния информационной безопасности реализуются в ходе применения отдельных методов защиты информации или их комплексов. Среди методов защиты информации можно выделить две большие группы: 1) неформальные; 2) формальные.

К первым относятся методы поддержания состояния информационной безопасности, обусловленные работой по контролю деятельности сотрудников со стороны внутреннего регламента, политик безопасности, правовых норм, актов и законов; деятельностью руководителей; состоянием грамотности и лояльности сотрудников организации.

Ко второй группе (формальные методы) относятся реализации программного обеспечения, разработанного для поддержания свойств безопасности информации, аппаратные решения, представленные различными техническими устройствами или дополнительными платами расширения, а также защищенные исполнения технических средств либо инженерные реализации объектов информационной инфраструктуры.

Для обеспечения безопасности целевого хоста или же сегмента сети используют различные средства, в том числе межсетевые экраны, антивирусы, IDS/IPS системы, обманные системы и прочие средства защиты. Все вышеупомянутые средства будут защищать от непосредственно проводимой атаки. Однако зачастую перед проведением атаки злоумышленник, анализируя перехваченный трафик, исследует целевой сегмент сети. В частности, первоначальным этапом исследования целевой ЭВМ является определение семейства и версии ОС, установленной на ней.

Таким образом, модифицируя параметры протокольных блоков данных, по которым происходит идентификация ОС, на параметры более защищенной ОС [1], можно добиться следующих результатов.

1. Отказ злоумышленника от проведения атаки.
2. Проведение неудачной атаки в связи с использованием неподходящих «эксплоитов».
3. Получение большего количества цифровых следов атакующего, что повышает шансы на его поимку и привлечение к ответственности.

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩЕГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ТИПА ОПЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Основы fingerprinting'a. Важная часть любой атаки на удаленный сетевой объект, как уже говорилось ранее, – сбор данных об удаленной системе. Более того, именно с разведки и начинается атака на удаленный хост. Чем больше известно о защищаемой сетевой инфраструктуре, тем проще злоумышленнику отыскать инструменты, чтобы найти в ее защите уязвимости и получить несанкционированный доступ к защищаемому сегменту сети. Вариантов проведения исследования огромное количество, однако, если не брать в расчет социальную инженерию и прочие экзотические способы, связанные с персоналом, которые, несомненно, не стоит сбрасывать со счетов, так как человек является самым уязвимым звеном в любой информационной структуре, то исследование удаленной системы начинается со сканирования сетевых портов, сбора баннеров с сервисов и, конечно же, с определения ОС, которая установлена на удаленном хосте. Последнее определяется с помощью так называемого OSfingerprinting'a.

Под термином fingerprinting подразумевается сбор информации об удаленной системе посредством компьютерной сети для последующего экспертного анализа. Под объектом исследования в таком случае понимают как операционную систему, так и внешние службы или сервисы, запущенные в операционной системе. Для сбора информации используют следующие методы:

- сбор баннеров и ручной анализ системы;
- активное исследование реализации протоколов;
- пассивное исследование реализации протоколов;
- исследование некоторых технических характеристик системы.

Для простоты понимания стоит рассмотреть следующий пример. Допустим, путем перехвата сетевого трафика в сети (sniffing'a) был получен пакет с данными. В его заголовке

находятся множество полей [2] вроде размера окна, TTL (время жизни пакета данных), DF (бит фрагментации), флага TOS (*Type-Of-Service*) и т. д. Именно эти данные и используют fingerprinting-утилиты в своей работе. Например, если бит DF не установлен, что присуще ОС *OpenBSD*, то в базе сигнатур отбрасываются все ОС, для которых DF указан, т. е. метод исключения. Далее, допустим, рассматривается параметр TTL: для *FreeBSD* и *Linux* этот параметр по умолчанию изначально равен 64. Вместе с тем круг потенциальных операционных систем сужается – и так до тех пор, пока не будут пройдены все тесты, вследствие чего будет получено минимальное количество претендентов.

Стоит отметить, что здесь есть много тонкостей, и процесс опознания версии операционной системы может не дать ожидаемых результатов.

Nmap [3]. Название *Nmap* – это сокращение от *networkmapper*. Сам *Nmap* представляет собой набор инструментов для сканирования сети. Он может применяться для проверки безопасности, просто для определения сервисов, запущенных на узле, для идентификации ОС и приложений, для определения типа firewall, используемого на сканируемом узле.

Для определения установленной ОС на сканируемом узле необходимо указать специальный ключ «-O»: *nmap -O target.host.com*.

На рис. 1 приведен пример содержания отчета ПО *Nmap*, который выводится на экран по окончании процесса определения типа ОС.

```
Starting Nmap 5.21 ( nmap.org ) at 2010-02-27 23:52 EST
Nmap scan report for 10.0.0.1
Host is up (0.0015s latency).
Not shown: 997 closed ports
PORT STATE SERVICE
53/tcp open domain
5009/tcp open airport-admin
10000/tcp open snet-sensor-mgmt
MAC Address: 00:11:24:6B:43:E2 (Apple Computer)
Device type: WAP|printer
Running: Apple embedded, Canon embedded, Kyocera embedded, Xerox embedded
OS details: VxWorks: Apple AirPort Extreme v5.7 or AirPort Express v6.3; Canon imageRUNNER printer
(5055, C3045, C3380, or C5185); Kyocera FS-4020DN printer; or Xerox Phaser 8860MFP printer
Network Distance: 1 hop
```

Рис. 1. Пример содержания отчета ПО *Nmap*

Как видно из рис. 1, *Nmap* предоставляет множество различной информации. Он отображает предположение об ОС, которая была запущена на узле. В данном случае выполнялось сканирование маршрутизатора *Apple AirportExtreme*.

Ниже приведены результаты другого сканирования – домашнего компьютера с запущенной *Ubuntu 9.10* (рис. 2). На рис. 2 показано, что система имеет сетевую карту HP, запущена ОС *Linux* между версиями 2.6.19 и 2.6.31. Стоит отметить, что невозможно явно идентифицировать дистрибутив, только версию *Linux* ядра.

p0f [4]. В отличие от *Nmap*, который использует алгоритмы для реализации активного fingerprinting'a, *p0f* работает исключительно пассивно. То есть в результате работы *p0f* не генерирует какой-либо трафик, который позволил бы обнаружить исследователя. Это особенно важно, если на удаленной машине установлено средство *Intrusion Detection System (IDS)* – средство обнаружения атак.


```
Starting Nmap 5.21 ( nmap.org ) at 2010-02-28 00:00 EST
Nmap scan report for 10.0.0.6
Host is up (0.0039s latency).
Not shown: 999 closed ports
PORT STATE SERVICE
22/tcp open  ssh
MAC Address: 00:17:08:2A:D6:F0 (Hewlett Packard)
Device type: general purpose
Running: Linux 2.6.X
OS details: Linux 2.6.19 - 2.6.31
Network Distance: 1 hop
```

Рис. 2. Пример содержания отчета ПО Nmap об ОС Ubuntu

Основная задача *p0f* – определить версию ОС на удаленном хосте, в том числе на следующих хостах:

- хостах, которые присоединяются к ЭВМ, на котором работает *p0f* (так называемый SYN режим);
- хостах, к которым подключается исследователь трафика (режим SYN+ACK);
- хостах, с которыми невозможно соединиться (режим RST+) из-за того, что *firewall* отклоняет попытки подключения;
- хостах, за взаимодействием которых имеется возможность наблюдать (исследование существующей сессии без необходимости какого-либо вмешательства).

Кроме того, *p0f*, в отличие от *Nmap*, может рассказать об ОС на удаленном хосте, даже если она находится за *firewall*.

Стоит отметить, что база отпечатков сетевых устройств постоянно пополняется. Делается это как за счет разработчиков, так и за счет пользователей, которые отправляют данные о своей системе на странице lcamtuf.coredump.cx/p0f-help.

Satori [5]. *Satori* использует для своей работы библиотеку *WinPCap*. Данная программа прослушивает весь передаваемый трафик по сети и выполняет идентификацию ОС на основе заголовков протоколов. В этом плане принцип работы такой же, как и у *p0f*, а также у большинства другого ПО идентификации семейства операционной системы пассивным методом.

Однако есть и отличия. Так, например, данное ПО позволяет идентифицировать не только машины семейства *Windows* или *Unix*, но и огромное количество других устройств, например, устройств, разработанных компанией HP (которые используют специальный протокол передачи собственной разработки), компанией *Cisco* (которые передают CDP пакеты) и IP-телефоны (которые отправляют пакеты *Skinny*). Кроме того, немалый вклад в результат, полученный с помощью *Satori*, дают методы, основанные на исследовании DNSР.

ЭМПИРИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ НА ЕГО РАЗРАБОТКУ

С теоретической точки зрения разработка программного комплекса (ПК) модификации сетевого трафика с целью сокрытия типа и версии операционной системы выглядит актуальной, и его применение, действительно, должно снижать риски, связанные с возникновением компьютерных атак. Однако открытым остается вопрос: «Как на практике доказать полезность будущего готового проекта?»

Для проверки гипотезы о том, что доля компьютерных атак, а соответственно, и риски, связанные с их успешным проведением, частично зависят от предустановленной на защищаемом узле сети операционной системы, был проведен следующий эксперимент.

Были развернуты два веб-сервера. На одном из них была установлена ОС *Windows 7*, на другом – последняя версия ОС *Debian*. На каждой ЭВМ работал *ApacheHTTPServer* с сайтом, кроме того, были открыты порты:

- 1) 20/21 – ftp сервис;
- 2) 22 – ssh сервис;
- 3) 23 – telnet сервис;
- 4) 25 – smtp сервис;
- 5) 110 – pop3 сервис.

Каждый узел был оборудован ПО *Snort*, запущенным в режиме обнаружения вторжений. Сделано это для сбора статистики о попытках проникновения и несанкционированного доступа к внутренним ресурсам серверов. Стоит отметить, что оба сервера запускались одновременно, работали непрерывно в течение двух недель и были остановлены одновременно. В случаях, когда возникали ошибки отказа в обслуживании и какой-либо сервер завершал свое функционирование, в кратчайшие сроки происходила проверка оборудования с последующим повторным запуском для восстановления полной работоспособности.

По завершению исследования было подсчитано общее количество атак, проведенных на каждую из машин. В итоге обнаружено, что на сетевой узел с ОС *Windows 7* было совершено 72 атаки, а на узел с установленной ОС *Debian 10.3* – только 45.

Однако количество компьютерных атак нельзя рассматривать как абсолютный показатель защищенности ЭВМ. Необходимо также проверить, сколько вообще было произведено сканирований систем, поскольку, как уже говорилось ранее, сканирование системы является фундаментом для будущей атаки.

Анализ лог-файлов на предмет наличия в них записей о сканировании открытых портов обеих систем показал, что количество сканирований каждой из систем отличается весьма значительно: *Debian 10.3* – 107, а *Windows 7* – 98.

Таким образом, имеется возможность сравнить отношение количества проведенных атак к количеству проведенных сканирований открытых портов: *Debian 10.3* – 42% и *Windows 7* – 73%.

Исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что операционную систему *Debian 10.3* выбирают целью атак с меньшей вероятностью, нежели операционную систему *Windows 7*. Таким образом, риски, связанные с возможностью проведения компьютерной атаки при использовании более защищенной операционной системы снижаются почти на треть, что позволяет еще до начала разработки программного комплекса модификации данных приблизительно оценить его эффективность.

Математическая постановка задачи. Основные требования, предъявляемое к ПК модификации сетевого трафика для сокрытия типа и версии ОС с целью защиты сегмента сети от потенциальных компьютерных атак, – снижение рисков, связанных с проведением возможных атак на защищаемый объект автоматизации.

Исходные данные:

1. Сетевые пакеты, принимаемые сетевым интерфейсом ПК от защищаемого сегмента сети:

$$X = \{X_1, X_2, \dots, X_k\}.$$

2. Сетевые пакеты, модифицированные ПК, перенаправляемые во внешнюю сеть:

$$X' = \{X'_1, X'_2, \dots, X'_k\}.$$

3. Идентифицирующие признаки исходной операционной системы, расположенные в поступающем на ПК от защищаемого сегмента сети трафике:

$$Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}.$$

4. Результирующие идентифицирующие признаки операционной системы, расположенные в исходящем от ПК сетевом трафике:

$$Y' = \{y'_1, y'_2, \dots, y'_n\}.$$

5. F – отображение (модификация) входящего сетевого трафика, отправляемого со стороны защищаемого сегмента сети к ПК, в исходящий трафик, отправляемый во внешнюю сеть.

6. R – риски, связанные с проведением компьютерной атаки на защищаемый сегмент сети.

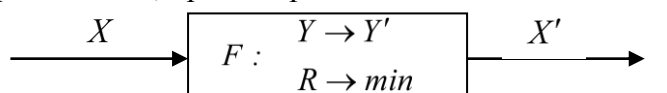
Ограничения и допущения: возможность физического доступа к каналу передачи данных.

Необходимо:

1. Сформировать матрицу идентифицирующих признаков, которая будет состоять из векторов $\{S_1, \dots, S_m\}$, в каждом из которых содержатся признаки $\{S_{i1}, \dots, S_{in}\}$ для конкретной ОС, предположительно более защищенной:

$$\begin{bmatrix} S_{11} & \dots & S_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ S_{m1} & & S_{mn} \end{bmatrix}.$$

2. Найти такое отображение F , при котором



3. Разработать ПК модификации сетевого трафика для сокрытия типа и версии ОС с целью защиты сегмента сети от потенциальных компьютерных атак, позволяющий снизить риски, связанные с успешным проведением атак на защищаемый объект автоматизации.

ВЫЯВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТРАФИКА ТСП/Р, ПОЗВОЛЯЮЩИХ ОПРЕДЕЛИТЬ ТИП ОПЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Существующие базы отпечатков ОС. На начальном этапе разработки искомого ПК необходимо определиться с параметрами, позволяющими однозначно идентифицировать ОС.

Каждое из рассмотренных выше программных средств обладает базой отпечатков ОС, составленной на основе параметров, анализ которых проводится в ходе тестирования.

Стоит отметить, что база отпечатков может быть представлена в любом виде, однако в большинстве случаев используется либо простой текстовый документ со строгим описанием, либо структурированный документ в формате XML.

На рис. 3 представлен отпечаток операционной системы *FreeBSD 10.1*, входящий в базу ПО *Nmap*. Как видно из рис. 3, информация представлена в текстовом виде.

Несмотря на простое текстовое представление информации, для разделения различных полей используются ключевые слова. Так, например, *Fingerprint* обозначает начало нового отпечатка, после чего следует слово *Class*, обозначающее семейство, к которому принадлежит данный отпечаток операционной системы. Оставшиеся поля: SEQ, OPS, WIN, ECN, T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7, U1 и IE «рассказывают» о проводимых тестах, которые использовались для идентификации операционной системы, а также о выводах, сделанных в ходе проведения теста.

Автор *Satori* в своей программе решил разделить базу на несколько отдельных файлов. Кроме того, каждый файл строго структурирован благодаря использованию XML-тегов.

Каждый файл отвечает за хранение специфичных параметров сетевого трафика определенного протокола. При этом каждый отпечаток имеет свой вес. За каждое совпадение исследуемого сетевого трафика с базой отпечатков набирается условный вес, т. е. повышается вероятность принадлежности к тому или иному типу и версии ОС.

```
# FreeBSD 10.1-RELEASE FreeBSD 10.1-RELEASE #0 r274401: Tue Nov 11 21:02:49 UTC 2014 amd64
Fingerprint FreeBSD 10.1-RELEASE
Class FreeBSD | FreeBSD | 10.X | general purpose
CPE cpe:/o:freebsd:freebsd:10.1 auto
SEQ(SP=F4-104%GCD=1-6%ISR=104-110%TI=I%CI=I%II=I%SS=S%TS=21)
OPS(O1=M538NW6ST11%O2=M538NW6ST11%O3=M280NW6NNT11%O4=M538NW6ST11%O5=M218NW6ST11%O6=M109ST11)
WIN(W1=FFFF%W2=FFFF%W3=FFFF%W4=FFFF%W5=FFFF%W6=FFFF)
ECN(R=Y%DF=Y%T=3B-45%TG=40%W=FFFF%O=M538NW6SLL%CC=N%Q=)
T1(R=Y%DF=Y%T=3B-45%TG=40%S=O%A=S+%F=AS%RD=0%Q=)
T2(R=N)
T3(R=Y%DF=Y%T=3B-45%TG=40%W=FFFF%S=O%A=S+%F=AS%O=M109NW6ST11%RD=0%Q=)
T4(R=Y%DF=Y%T=3B-45%TG=40%W=0%S=A%A=Z%F=R%O=%RD=0%Q=)
T5(R=Y%DF=Y%T=3B-45%TG=40%W=0%S=Z%A=S+%F=AR%O=%RD=0%Q=)
T6(R=Y%DF=Y%T=3B-45%TG=40%W=0%S=A%A=Z%F=R%O=%RD=0%Q=)
T7(R=Y%DF=Y%T=3B-45%TG=40%W=0%S=Z%A=S%F=AR%O=%RD=0%Q=)
U1(DF=N%T=3B-45%TG=40%IPL=38%UN=0%RIPL=G%RID=G%RIPCK=G%RUCK=G%RUD=G)
IE(DFI=S%T=3B-45%TG=40%CD=S)
```

Рис. 3. Отпечаток ОС FreeBSD в ПО Nmap

На рис. 4, для сравнения параметров, по которым происходит идентификация, показан пример аналогичного отпечатка операционной системы *FreeBSD* в ПО *Satori*.

Так, например, в данном ПО вместо создания множества полных отпечатков для ОС, использовали другой подход – для одной версии ОС задается несколько возможных наборов параметров.

```
<fingerprint name="FreeBSD 6.x" os_name="FreeBSD 6" os_class="FreeBSD" os_vendor="FreeBSD" os_url="http://www.freebsd.org" device_t
  <tcp_tests>
    <test weight="5" matchtype="exact" tcpflag="S" tcpsig="65535:64:1:64:M1460,N,W1,N,N,T,S,E:."/>
  </tcp_tests>
</fingerprint>
<fingerprint name="FreeBSD 7.0" os_name="FreeBSD 7" os_class="FreeBSD" os_vendor="FreeBSD" os_url="http://www.freebsd.org" device_t
  <tcp_tests>
    <test weight="5" matchtype="exact" tcpflag="S" tcpsig="65535:64:1:60:M1460,N,W3,S,T:."/>
  </tcp_tests>
</fingerprint>
<fingerprint name="FreeBSD 7.1" os_name="FreeBSD 7" os_class="FreeBSD" os_vendor="FreeBSD" os_url="http://www.freebsd.org" device_t
  <tcp_tests>
    <test weight="5" matchtype="exact" tcpflag="S" tcpsig="65535:64:1:48:M1460,S,E:."/>
    <test weight="5" matchtype="exact" tcpflag="SA" tcpsig="65535:64:1:60:M1460,N,W3,S,T:AT"/>
    <test weight="5" matchtype="exact" tcpflag="SA" tcpsig="65535:64:1:48:M1460,S,E:A"/>
  </tcp_tests>
</fingerprint>
<fingerprint name="FreeBSD 7.2" os_name="FreeBSD 7" os_class="FreeBSD" os_vendor="FreeBSD" os_url="http://www.freebsd.org" device_t
  <tcp_tests>
    <test weight="5" matchtype="exact" tcpflag="S" tcpsig="65535:64:1:60:M1460,N,W3,S,T:."/>
  </tcp_tests>
</fingerprint>
```

Рис. 4. Отпечаток ОС FreeBSD в ПО Satori

Наконец, последней рассматриваемой базой отпечатков ОС является база ПО *p0f*. Несмотря на текстовое представление информации в данной базе, формирование отпечатков в ней все же является достаточно специфичным. Первой особенностью состоит в использовании знака « ; » в качестве обозначения начала комментария. Вторая особенность заключается в

указании диапазона возможных значений для каждого из исследуемых параметров сетевого трафика. В остальном – все стандартно, а именно, некоторые параметры протокола IP, некоторые параметры протокола TCP и обязательно в каждой сигнатуре записаны опции протокола TCP в строго определенном порядке.

Пример отпечатка операционной системы семейства *FreeBSD* приведен на рис. 5.

```
; -----  
; FreeBSD  
; -----  
label = s:unix:FreeBSD:9.x or newer  
sig   = *:64:0*:65535,6:mss,nop,ws,sok,ts:df,id+:0  
  
label = s:unix:FreeBSD:8.x  
sig   = *:64:0*:65535,3:mss,nop,ws,sok,ts:df,id+:0  
  
; Catch-all rules:  
label = g:unix:FreeBSD:  
sig   = *:64:0*:65535,*:mss,nop,ws,sok,ts:df,id+:0
```

Рис. 5. Отпечаток ОС *FreeBSD* в ПО *p0f*

Выбор формата базы отпечатков операционных систем. В рамках решения поставленной задачи нет необходимости создания настолько огромной базы отпечатков, как это сделано в рассмотренных выше программных средствах. Связано это с тем, что для обмана потенциального противника/злоумышленника, достаточно использовать несколько отпечатков ОС, причем отбор отпечатков необходимо произвести исходя из достижения следующих целей:

- для защищенных операционных систем – с целью снижения рисков, связанных с возможным проведением компьютерных атак на защищаемый сегмент сети;
- для менее защищенных операционных систем – при использовании в совокупности с такими средствами защиты, как обманные системы с целью получения большего количества информации о злоумышленнике, стремящемся получить несанкционированный доступ, с целью повышения вероятности привлечения его к ответственности за содеянное.

Под защищенными, например, можно понимать последние версии операционных систем семейств *FreeBSD*, *Linux* и некоторых других *Unix*-подобных систем.

Под незащищенными – устаревшие версии операционных систем, как, например, *Windows XP*, *Windows Vista*, *Windows 7* и *Unix*-подобные системы, работающие на старых версиях ядра.

Кроме того, в связи с постоянным технологическим прогрессом, актуальные и рассматриваемые на текущий момент как защищенные ОС в будущем будут устаревать, в них будут обнаруживаться ошибки и уязвимости, что позволяет говорить о необходимости иметь возможность оперативно актуализировать информацию в создаваемой базе отпечатков, причем как вручную специалистами, так и обычными пользователями. Таким образом, необходимо, чтобы информация в базе была наиболее удобочитаема, для чего предлагается использовать расширяемый язык разметки XML.

В результате разумным решением, на взгляд авторов, является создание базы отпечатков на основе существующей базы ПО *Satori* путем ее уменьшения, упрощения и доработки.

На рис. 6 представлен пример описания отпечатка ОС в создаваемой базе. Из рисунка видно, что уменьшение и упрощение базы ПО *Satori* затронули веса, а также различные варианты сигнатур, поскольку однозначно определено, какую сигнатуру рассмотренные ранее программные комплексы будут идентифицировать как заданную операционную систему.

Таким образом, каждый отпечаток операционной системы состоит из следующих частей:

- версии (имени) операционной системы;
- семейства (типа), к которому операционная система принадлежит;
- сигнатур для разного типа TCP-пакетов:
 SYN – пакетов (установление соединения);
 SYN, ACK – пакетов (ответ на запрос установления соединения);
- сигнатуры HTTP-запроса (user-agent).

```

1  <?xml version='1.0' encoding='UTF-8'?>
2  <fingerprints>
3    <fingerprint os_name="FreeBSD 3.4" os_class="FreeBSD">
4      <tcp>
5        <SA tcpsig="16384:64:1:44:M1460"/>
6        <S tcpsig="16384:64:1:44:M1460"/>
7      </tcp>
8      <http user-agent="X11; FreeBSD i386"/>
9    </fingerprint>

```

Рис. 6. Отпечаток ОС FreeBSD в создаваемой базе отпечатков

При этом каждая TCP/IP сигнатура состоит из следующих элементов :

- *Window size*;
- TTL (Time to Life);
- DF (Don't Fragment) bit;
- общая длина TCP опций в байтах;
- TCP опции.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ МОДИФИКАЦИИ ТРАФИКА, ПЕРЕДАВАЕМОГО В ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ. ПРИНЦИП РАБОТЫ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА

Принцип встраивания в существующую сеть. Для успешной модификации отпечатка ОС необходимо определить место разрабатываемого ПК в топологии сети защищаемой организации.

Представляется, что ПК должен иметь гибкую систему выбора защищаемой инфраструктуры:

- защита всей сети;
- защита заданной подсети;
- защита выделенного хоста.

Стандартная организация доступа к ГВС «Интернет» без учета устройства внутренней части сети включает в себя сетевую инфраструктуру компании, подключенную к сетевому коммутатору, непосредственно уже имеющему доступ к ГВС «Интернет». При этом внедрение в существующее соединение в условиях ранее указанных требований по настройке ПК может иметь вид, представленный на рис. 7.

Таким образом, через ПК должен проходить весь сетевой трафик компании. При наличии еще удаленных подразделений подключать их в общую схему взаимодействия необходимо аналогичным образом.

Принцип передачи сетевого трафика в режиме сетевого моста. *Network bridge* (Сетевой мост) – это сетевое устройство, предназначенное для объединения сегментов сети передачи данных в единую сеть.

Для корректной работы разрабатываемого ПК, согласно принципиальной схеме, включение его в существующую сеть необходимо производить так, как указано выше. Для разрабатываемого ПК будет достаточно наличия двух сетевых интерфейсов. Первый – принимает исходящий трафик от защищаемого сегмента и передает его через второй интерфейс во внешнюю сеть. Аналогично второй – принимает исходящий трафик из внешней сети и передает его через первый интерфейс в защищаемый сегмент.

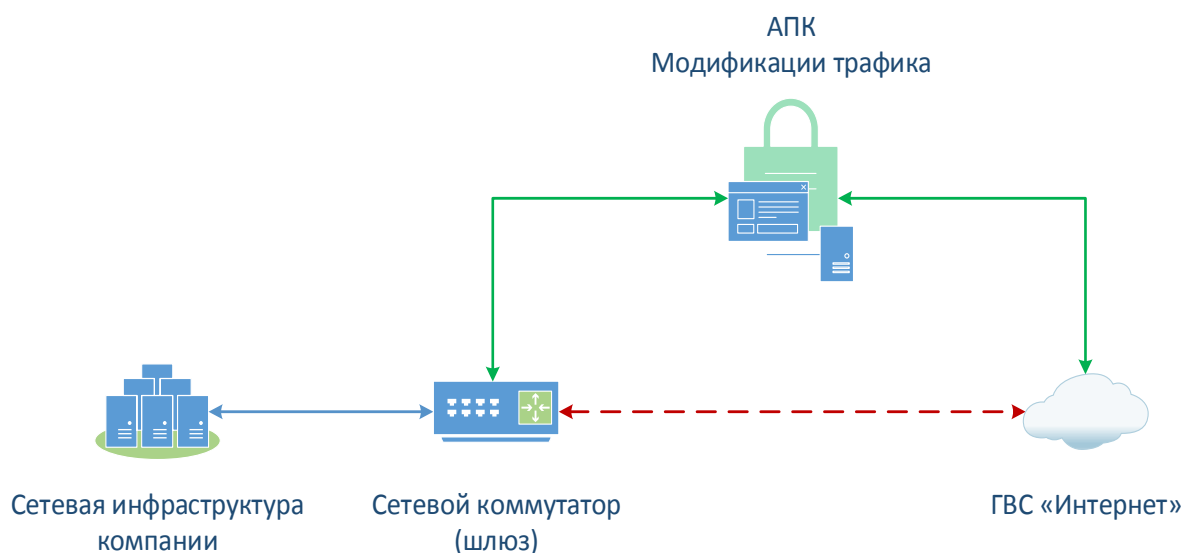


Рис. 7. Предлагаемая организация доступа в ГВС «Интернет»

Приведенный алгоритм передачи сетевого трафика для решения задачи по изменению характерных признаков операционной системы в сетевом трафике с целью снижения рисков проведения компьютерных атак достаточно дополнить этапом модификации (рис. 8).



Рис. 8. Работа сетевого моста с модификацией трафика

Динамическая модификация сетевого трафика. Как уже было упомянуто ранее, схема модификации трафика незначительно отличается от простого перехвата с последующим перенаправлением сетевого трафика.

Анализ параметров сетевого трафика протоколов TCP/IP, а также исследование существующих баз данных отпечатков операционных систем позволили сформировать сигнатуры различных типов и версий ОС, используемых при идентификации (табл. 1). Расшифровка параметров была приведена ранее. Использование нескольких параметров позволяет повысить точность определения типа операционной системы. Таким образом, их комбинация позволяет практически безошибочно определить тип ОС [за исключением случаев намеренной подмены данных полей при использовании криптозащищенных туннелей или инкапсулирующих протоколов типа *GRE (GenericRoutingEncapsulation)*].

Таблица 1

Сигнатуры типов ОС

Параметры	Операционные системы					
	Windows		FreeBSD		Ubuntu	MacOS X 10.14
	Windows 10	Windows XP	FreeBSD 10.2	FreeBSD 3.4		
Window size	65535	17640	65535	16384		
TTL	128	128	64	64	64	64
DF flag	1	1	1	1	1	1
Length	52	48	48	44	60	44
MSS	1380	1460	1460	1460	1460	1380
Порядок TCP опций	N,W3,N,N,S	N,N,S	S,E	-	S,T,N,W1	N,N,S
User-Agent	Windows NT 10.0; WOW64	Windows NT 5.1; WOW32	X11; FreeBSD amd64	X11; FreeBSD i386	X11; Ubuntu; Linux x86_64	Macintosh; Intel Mac OS X 10.14.1

В результате после захвата и анализа пакетов появляется возможность модифицировать тип и версию ОС участников информационного обмена, не выдавая при этом своего присутствия.

Следует отметить, что именно благодаря разработчикам, которые не следовали рекомендациям документов RFC, сформировались подобные сигнатуры стека протоколов TCP/IP, позволяющие идентифицировать практически любой тип и версию существующей ОС. Так, например, согласно RFC 1700, *рекомендуемое* значение параметра TTL в заголовке IP-пакета равно 64, однако такие ОС как *Windows (128)*, и *Cisco IOS (255)* не придерживаются данных рекомендаций.

Для доступа к интернет-ресурсам, помимо изменений в протоколе TCP и смены TTL в протоколе IP, необходимо изменять данные, передаваемые на прикладном уровне OSI. В данном случае подразумевается протокол HTTP, в котором существует поле *User-Agent*, предоставляющее серверу доступ к информации об используемом web-браузере.

Демонстрацию параметров, требующих модификации, лучше всего проводить при помощи ПО *Wireshark* [6]. *Wireshark* – это анализатор сетевых пакетов. Данное ПО позволяет представлять захваченные пакеты в наиболее подробном виде, автоматически разбирая входящие в пакет данные по протоколам, а сами протоколы – на входящие в них поля.

Далее в визуальном виде представлены параметры, которые необходимо модифицировать для смены отпечатка операционной системы в сетевом трафике. Стоит отметить, что смена одних параметров влечет за собой необходимость изменения других параметров. Это связано с наличием контрольных сумм в заголовках протоколов, позволяющих проверять корректность передачи данных, т. е. исключить возможные ошибки при передаче.

Конечно, изменение, например значения параметра TTL в IP-заголовке, не будет влиять на необходимость модификации параметра *TotalLength*, однако в дальнейшем может потребоваться изменение опций протокола TCP, при несовпадении их размеров необходимо будет скорректировать значение *TotalLength* для изменения размеров пакета.

Протокол HTTP версии 1.1 является текстовым, поэтому достаточно прост для понимания. Подробно структура HTTP-запросов и HTTP-ответов описана в RFC2616 [7]. На рис. 9 продемонстрирована структура HTTP-запроса при получении страницы с удаленного ресурса в ПО *Wireshark*.

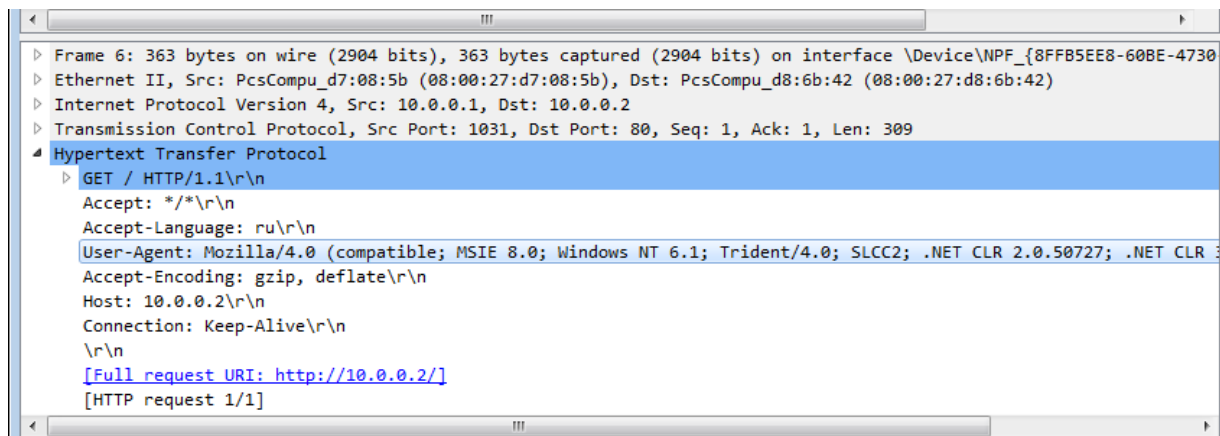


Рис. 9. Поля HTTP заголовка, требующие модификации

Очевидно наличие информации, позволяющей идентифицировать тип ОС в поле *User-Agent*. При изменении отпечатка ОС данный параметр также требует модификации.

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА МОДИФИКАЦИИ СЕТЕВОГО ТРАФИКА ДЛЯ СОКРЫТИЯ ТИПА И ВЕРСИИ ОС С ЦЕЛЬЮ ЗАЩИТЫ СЕГМЕНТА СЕТИ ОТ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ АТАК

Обобщенная методика подмены отпечатка ОС. Разработанный ПК позволяет подменить тип и версию ОС на базе анализа передаваемого трафика и распознавания специфичных параметров. В основе распознавания специфичных параметров лежат данные, полученные благодаря анализу сетевого трафика, а также из баз данных ПО *p0f* и *Satori*. При этом ПК состоит из отдельных модулей, каждый из которых отвечает за выполнение отдельной функциональной возможности.

База данных эталонных векторов специфичных параметров представлена набором специфичных параметров, которые характерны для различных типов и версий ОС (*Windows*, *Linux*, *FreeBSD*).

Методика смены отпечатка ОС состоит из двух основных этапов.

Этап 1. На первом этапе осуществляются запуск ПК, загрузка из используемой базы данных информации об эталонных параметрах заданных операционных систем. Происходит выбор режима работы: защита всего сегмента сети или заданного узла. При защите только заданного узла трафик, передаваемый от всех остальных узлов, будет оставаться неизменным. Кроме того, на данном этапе происходят выбор сетевых интерфейсов, используемых для работы, а также выбор ОС, под которую планируется «мимикрировать» [1].

Этап 2. На втором этапе осуществляется динамический анализ передаваемого трафика при обнаружении параметров, позволяющих идентифицировать ОС узла, находящегося в защищаемом сегменте сети. Происходит смена данных параметров на параметры ОС, выбранной на первом этапе.

Алгоритм динамической смены отпечатка ОС в передаваемом сетевом трафике включает в себя изменение полей заголовков IP, TCP, HTTP. Кроме того, при изменении полей требу-

ется пересчет значений полей исходных контрольных сумм, а при несовпадении длины изменяемых TCP опций и поля *User-Agent* требуется изменение поля IP-заголовка, отвечающего за расчет длины передаваемого пакета.

Применение программного комплекса. Использование отпечатков ОС, заданных по умолчанию. Графический интерфейс разработанного ПК показан на рис. 10.

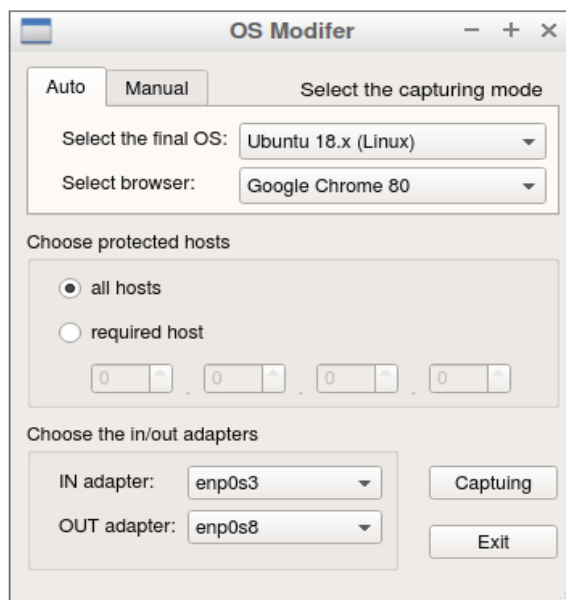


Рис. 10. Графический интерфейс разработанного программного комплекса

Перед началом работы предоставляется возможность выбора сигнатур ОС и web-браузера, на которые будет производиться смена исходных значений (рис. 11). Кроме того, требуется определить сетевые интерфейсы, которые будут использоваться для работы, а также режим работы ПК – защита указанного узла или всей сети.

Сетевой интерфейс *IN adapter* будет использоваться для получения трафика от защищаемого внутреннего сегмента сети, его модификации и для последующей его передачи на второй сетевой интерфейс.

Сетевой интерфейс *OUT adapter* будет использоваться для получения трафика от внешнего сегмента сети (ГВС «Интернет») с целью его передачи на первый сетевой интерфейс.

Таким образом, модификации будет подвергнут только тот трафик, который будет поступать на сетевой интерфейс ПК *IN adapter*.

Стоит отметить, что часть поля *User-Agent* содержится в сигнатуре ОС, а часть – в сигнатуре web-браузера. Непосредственно при старте модификации трафика, т. е. по нажатию кнопки *Capturing*, производится совмещение сигнатур и составление полного поля *User-Agent*, на которое и будет производиться замена исходного значения поля.

Добавления новых отпечатков ОС в БД. На рис. 12 представлен графический интерфейс модуля, отвечающего за создание и добавление новых отпечатков ОС в БД, используемую разработанным ПК. Отдельно на рис. 12 отмечены кнопки навигации, позволяющие изменять положение TCP-опций, выбранных из общего списка опций – расположен справа от кнопок навигации.

По нажатию кнопки *Add (to end)* происходит добавление выбранной TCP опции из общего списка в список, отвечающий за создание новой сигнатуры (слева). Если список был пуст, то выбранная опция будет находиться на первом месте. По нажатию кнопки *Insert* происходит вставка выбранной TCP-опции из общего списка сразу после опции, выбранной в левом списке. Все опции, идущие за изначально выбранной, сдвигаются. По нажатию клавиши *Del*

происходит удаление выбранной опции из создаваемого списка. Клавиши *Up* и *Down* позволяют перемещать выбранные TCP-опции из создаваемого списка вниз и вверх соответственно. Стоит отметить, что при выборе первой опции из созданного списка и нажатии кнопки *Up* произойдет ее перемещение в конец. Аналогично при выборе последней опции из создаваемого списка и нажатии кнопки *Down* произойдет ее перемещение в начало списка.

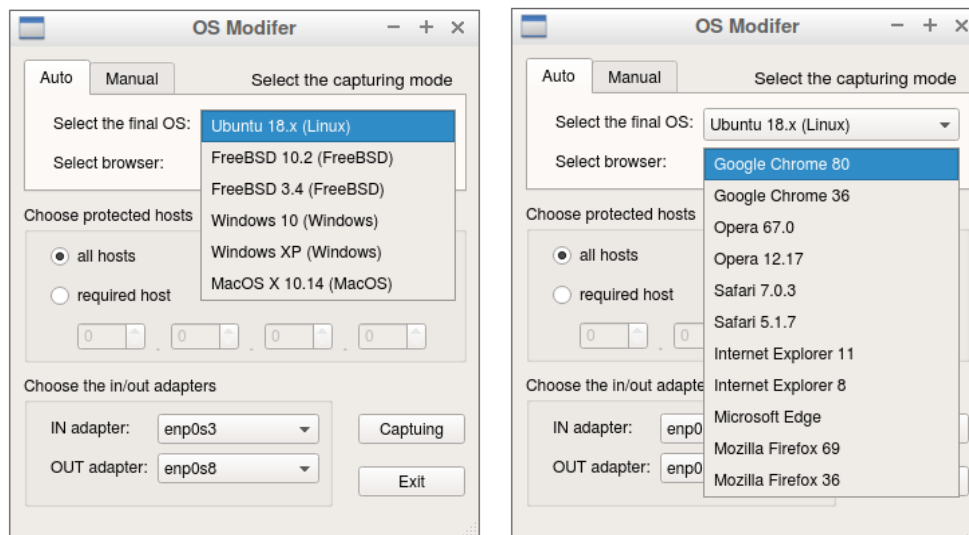


Рис. 11. Выбор сигнатур ОС и web-браузера

При добавлении опции, имеющей значение, будет вызвано диалоговое окно ввода значения (рис. 13). После ввода значения и нажатия кнопки подтверждения в создаваемый список опций будут записаны название опции и ее значение через символ двоеточия.

Создание сигнатур доступно как для SYN-пакетов (инициализация соединения), так и для SYN-ACK пакетов (ответ на запрос создания соединения). Оно осуществляется по нажатию кнопок *Generate S* и *Generate SA* соответственно. По нажатию этих кнопок происходит считывание параметров из разделов *IP Options* и *TCP Options*, перевод названий TCP-опций из наиболее удобного для прочтения человеком в укороченный вид. Кроме того, автоматически подсчитывается их длина.

Для создания сигнатуры ОС требуется генерация S-сигнатуры и SA-сигнатуры. По нажатию кнопки *Save* происходит сохранение создаваемой сигнатуры в БД, используемую по умолчанию, запись осуществляется в конец БД. Пример сигнатуры, созданной на основе параметров, ввод которых продемонстрирован на рис. 12, показан на рис. 14.

Отпечатки, сохраненные в исходную БД, автоматически подгружаются в ПК, т. е. доступны для выбора сразу после возвращения на вкладку *Auto*.

Пример реализации динамической модификации отпечатка ОС. Для моделирования внешних и внутренних сегментов сети использовано ПО *GNS3 (Graphical Network Simulator)*. Оно позволяет создавать различные сетевые топологии на одном компьютере. Эмулятор *GNS3* позволяет создать модель компьютера или другого устройства и запускать внутри оригинальное ПО. Эмулируются все основные компоненты устройства, в том числе процессор, память и устройства ввода/вывода. Имитируемая схема сети была существенно упрощена. Топология сети представлена на рис. 15.

Таким образом, было запущено три виртуальных машины. Две – под управлением ОС *Windows 7* (слева и справа). В центре расположена виртуальная машина под управление ОС *Lubuntu*, на которой и будет развернут разработанный ПК.

На каждой из машин под управлением ОС *Windows 7* развернуто ПО *Wireshark* для отслеживания передаваемых сетевых пакетов, а также их изменений. Кроме того, в качестве пас-

сивного средства идентификации типа ОС на машине с IP-адресом 10.0.0.2 будет использовано ПО *NetworkMiner*, а для организации взаимодействия между сегментами сети (машинами с IP 10.0.0.1 и 10.0.0.2) поднят сервер *nginx*. Предполагаемый вариант демонстрации – обращение со стороны машины из внутреннего сегмента (IP 10.0.0.1) к удаленному web-ресурсу – на машине с IP 10.0.0.2.

В итоге будет смоделирована работа в ГВС «Интернет». Доступ к удаленному ресурсу будет осуществляться через встроенный web-браузер *Internet Explorer 8*.

На рис. 16–19 показана смена отпечатка ОС.

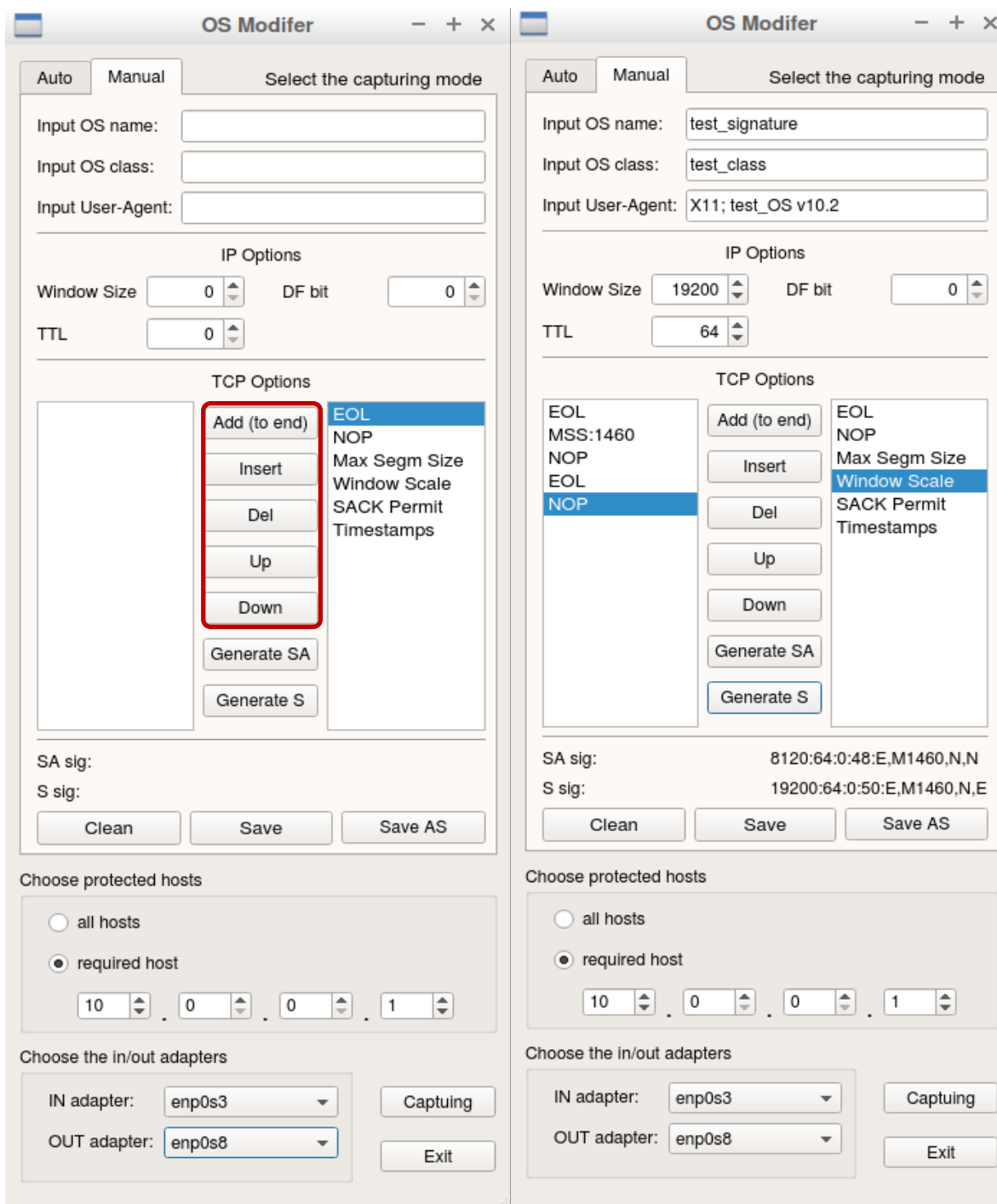


Рис. 12. Создание новой сигнатуры

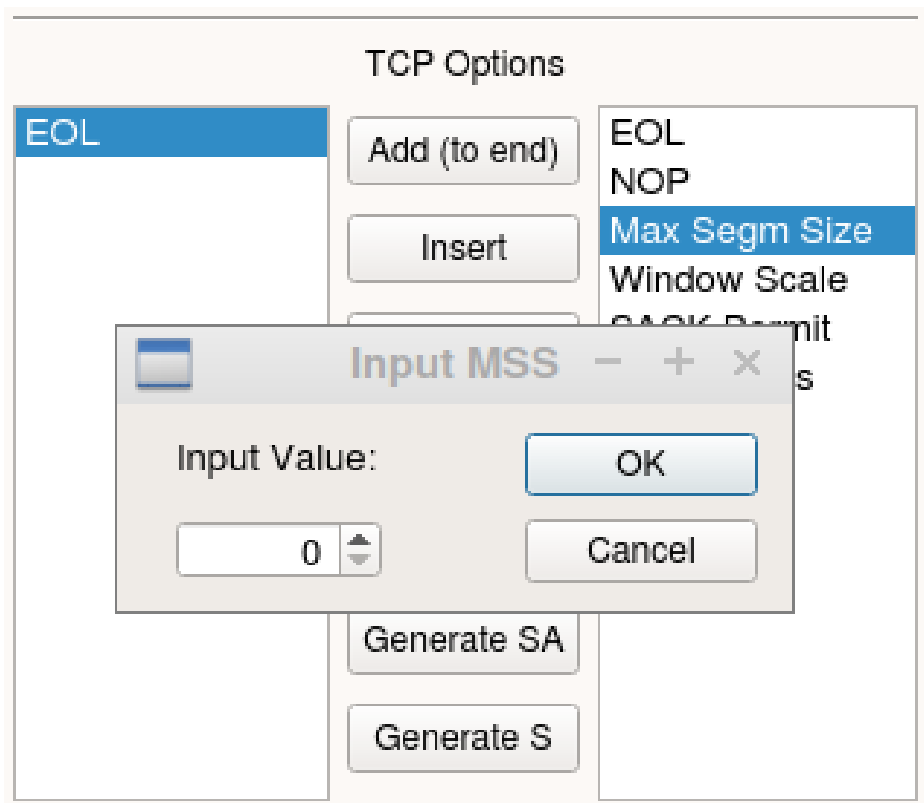


Рис. 13. Добавление опции, имеющей значение

```

<fingerprint os_class="MacOS" os_name="MacOS X 10.14">
  <tcp>
    <SA tcpsig="5840:60:1:48:M1380,N,N,S"/>
    <S tcpsig="65535:64:1:64:M1380,N,W3,N,N,T,S,E:P"/>
  </tcp>
  <http user-agent="Macintosh; Intel Mac OS X 10.14.1"/>
</fingerprint>
<fingerprint os_class="test_class" os_name="test_signature">
  <tcp>
    <SA tcpsig="8120:64:0:48:E,M1460,N,N"/>
    <S tcpsig="19200:64:0:50:E,M1460,N,E,N"/>
  </tcp>
  <http user-agent="X11; test_OS v10.2"/>
</fingerprint>
</fingerprints>

```

Рис. 14. Запись новой сигнатуры в исходную БД

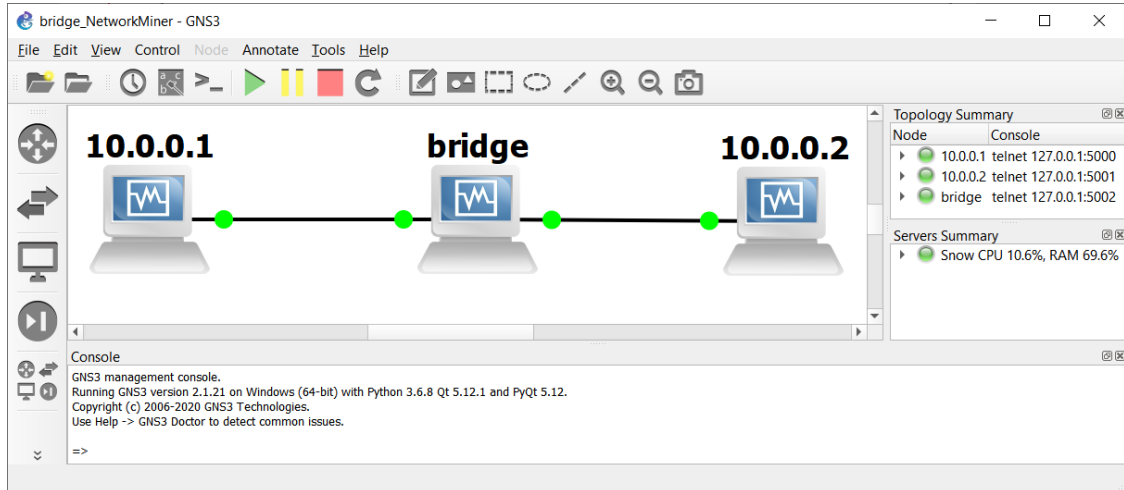


Рис. 15. Имитируемая схема сети

```

Frame 4: 66 bytes on wire (528 bits), 66 bytes captured (528 bit) on interface 0
Ethernet II, Src: PcsCompu_d7:08:5b (08:00:27:d7:08:5b), Dst: PcsCompu_d8:61:52:33 (08:00:27:d8:61:52:33)
Internet Protocol Version 4, Src: 10.0.0.1, Dst: 10.0.0.2
  0100 .... = Version: 4
  .... 0101 = Header Length: 20 bytes (5)
  Differentiated Services Field: 0x00 (DSCP: CS0, ECN: Not-ECT)
  Total Length: 52
  Identification: 0x0033 (51)
  Flags: 0x4000, Don't fragment
  ...0 0000 0000 0000 = Fragment offset: 0
  Time to live: 128
  Protocol: TCP (6)
  Header checksum: 0x0000 [validation disabled]
  [Header checksum status: Unverified]
  Source: 10.0.0.1
  Destination: 10.0.0.2
Transmission Control Protocol, Src Port: 1034, Dst Port: 80, Seq: 2968337108, Len: 48
  0100 .... = Version: 4
  .... 0101 = Header Length: 20 bytes (5)
  Differentiated Services Field: 0x00 (DSCP: CS0, ECN: Not-ECT)
  Total Length: 48
  Identification: 0x0033 (51)
  Flags: 0x4000, Don't fragment
  ...0 0000 0000 0000 = Fragment offset: 0
  Time to live: 64
  Protocol: TCP (6)
  Header checksum: 0x2693 [validation disabled]
  [Header checksum status: Unverified]
  Source: 10.0.0.1
  Destination: 10.0.0.2
Transmission Control Protocol, Src Port: 1034, Dst Port: 80, Seq: 2968337108, Len: 52

```

Рис. 16. Модификация IP заголовка (SYN-пакет)

```

Ethernet II, Src: PcsCompu_d7:08:5b (08:00:27:d7:08:5b), Dst: PcsCompu_d8:61:52:33 (08:00:27:d8:61:52:33)
Internet Protocol Version 4, Src: 10.0.0.1, Dst: 10.0.0.2
Transmission Control Protocol, Src Port: 1034, Dst Port: 80, Seq: 0, Len: 0
  Source Port: 1034
  Destination Port: 80
  [Stream index: 0]
  [TCP Segment Len: 0]
  Sequence number: 0 (relative sequence number)
  Sequence number (raw): 2968337108
  [Next sequence number: 1 (relative sequence number)]
  Acknowledgment number: 0
  Acknowledgment number (raw): 0
  1000 .... = Header Length: 32 bytes (8)
  Flags: 0x002 (SYN)
  Window size value: 8192
  [Calculated window size: 8192]
  Checksum: 0x1429 [unverified]
  [Checksum Status: Unverified]
  Urgent pointer: 0
Options: (12 bytes), Maximum segment size, No-Operation (NOP), Window scale
  TCP Option - Maximum segment size: 1460 bytes
  TCP Option - No-Operation (NOP)
  TCP Option - Window scale: 2 (multiply by 4)
  TCP Option - No-Operation (NOP)
  TCP Option - No-Operation (NOP)
  TCP Option - SACK permitted
Ethernet II, Src: PcsCompu_d7:08:5b (08:00:27:d7:08:5b), Dst: PcsCompu_d8:61:52:33 (08:00:27:d8:61:52:33)
Internet Protocol Version 4, Src: 10.0.0.1, Dst: 10.0.0.2
Transmission Control Protocol, Src Port: 1034, Dst Port: 80, Seq: 0, Len: 0
  Source Port: 1034
  Destination Port: 80
  [Stream index: 0]
  [TCP Segment Len: 0]
  Sequence number: 0 (relative sequence number)
  Sequence number (raw): 2968337108
  [Next sequence number: 1 (relative sequence number)]
  Acknowledgment number: 0
  Acknowledgment number (raw): 0
  0111 .... = Header Length: 28 bytes (7)
  Flags: 0x002 (SYN)
  Window size value: 65535
  [Calculated window size: 65535]
  Checksum: 0x3002 [unverified]
  [Checksum Status: Unverified]
  Urgent pointer: 0
Options: (8 bytes), Maximum segment size, SACK permitted, End of Option List
  TCP Option - Maximum segment size: 1460 bytes
  TCP Option - SACK permitted
  TCP Option - End of Option List (EOL)

```

Рис. 17. Модификация TCP заголовка (SYN-пакет)

На представленных рис. 16–18 видны изменения, производимые в передаваемых пакетах. В качестве примера взяты SYN пакет, используемый для начала сетевого взаимодействия, а также HTTP-запрос, предназначенный для получения web-страницы от удаленного сервера.

```

> Ethernet II, Src: PcsCompu_d7:08:5b (08:00:27:d7:08:5b), Dst: PcsCompu_d8:6b:42 (08:00:27:d8:6b:42)
> Internet Protocol Version 4, Src: 10.0.0.1, Dst: 10.0.0.2
> Transmission Control Protocol, Src Port: 1034, Dst Port: 80, Seq: 1, Ack: 1, Len: 390
4 Hypertext Transfer Protocol
  > GET / HTTP/1.1\r\n
  Accept: */*\r\n
  Accept-Language: ru\r\n
  User-Agent: Mozilla/4.0 (compatible; MSIE 8.0; Windows NT 6.1; Trident/4.0; SLCC2; .NET CLR 2.0.50727; .NET CLR
  Accept-Encoding: gzip, deflate\r\n
  If-Modified-Since: Tue, 21 Apr 2020 11:32:41 GMT\r\n
  If-None-Match: "5e9ed9d9-297"\r\n
  Host: 10.0.0.2\r\n
  Connection: Keep-Alive\r\n
  \r\n
  [Full request URI: http://10.0.0.2/]
  [HTTP request 1/1]

> Ethernet II, Src: PcsCompu_d7:08:5b (08:00:27:d7:08:5b), Dst: PcsCompu_d8:6b:42 (08:00:27:d8:6b:42)
> Internet Protocol Version 4, Src: 10.0.0.1, Dst: 10.0.0.2
> Transmission Control Protocol, Src Port: 1034, Dst Port: 80, Seq: 1, Ack: 1, Len: 325
4 Hypertext Transfer Protocol
  > GET / HTTP/1.1\r\n
  Accept: */*\r\n
  Accept-Language: ru\r\n
  User-Agent: Mozilla/5.0 (X11; FreeBSD amd64) AppleWebKit/537.36 (KHTML, like Gecko) Chrome/80.0.3987.163 Safari/537.36\r\n
  Accept-Encoding: gzip, deflate\r\n
  If-Modified-Since: Tue, 21 Apr 2020 11:32:41 GMT\r\n
  If-None-Match: "5e9ed9c9-297"\r\n
  Host: 10.0.0.2\r\n
  Connection: Keep-Alive\r\n
  \r\n
  [Full request URI: http://10.0.0.2/]
  [HTTP request 1/1]

```

Рис. 18. Модификация HTTP заголовка

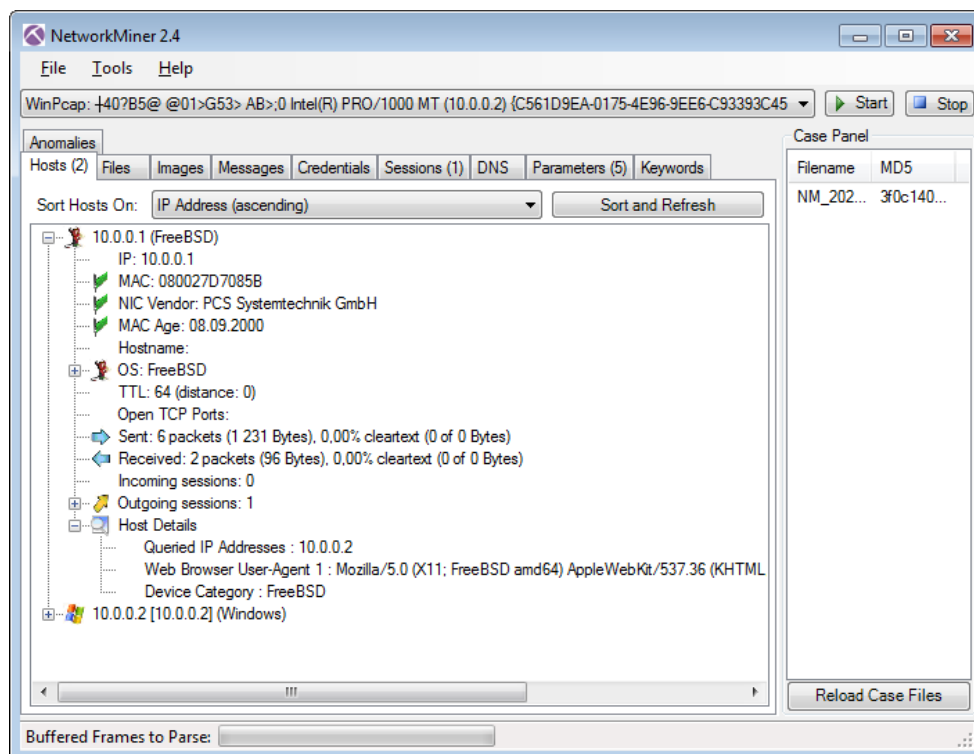


Рис. 19. Определение типа ОС в ПО NetworkMiner

Результатом модификации исходящего трафика от виртуальной машины с IP-адресом 10.0.0.1 является определение данной виртуальной машины как хоста с установленной ОС *FreeBSD 10.2*.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные теоретические и практические исследования показали, что разработка программного комплекса модификации сетевого трафика с целью сокрытия типа и версии операционной системы является актуальной, а его применение позволяет снизить риски, связанные с возникновением компьютерных атак.

Примечательным является тот факт, что реализованная в программном комплексе стратегия снижения риска была порождена интеллектуальной киберсистемой [1], способной осуществлять правдоподобные выводы по аналогии и пополнять свою базу знаний знаниями о потенциально реализуемых нарушителем процессах, а также знаниями о процессах, выполнение которых потенциально может предотвратить негативные последствия от возможных компьютерных атак.

Так, в результате исследований был разработан программный комплекс, позволяющий реализовать динамическую модификацию трафика в информационно-телекоммуникационной сети для смены отпечатка операционной системы защищаемых объектов с целью снижения рисков, связанных с проведением возможных компьютерных атак.

Список используемых источников

1. Андрушкевич Д. В., Бирюков Д. Н., Тимашов П. В. Порождение сценариев предотвращения компьютерных атак на основе логико-онтологического подхода // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2021. – Вып. 677. – С. 118–134.
2. Internet Protocol – спецификация протокола IP. – URL: <http://rfc.com.ru/rfc791.htm> (дата обращения: 21.07.2022).
3. Nmap: официальный сайт. – URL: <https://nmap.org/> (дата обращения: 21.07.2022).
4. p0F: официальный сайт. – URL: <https://kali.tools/?p=322> (дата обращения: 21.07.2022).
5. Satori – репозиторий проекта. – URL: <https://github.com/xnih/satori> (дата обращения: 21.07.2022).
6. Wireshark: официальный сайт. – URL: <https://www.wireshark.org/download.html> (дата обращения: 21.07.2022).
7. Hypertext Transfer Protocol -- HTTP/1.1 – спецификация протокола HTTP/1.1. – URL: <https://www.ietf.org/rfc/rfc2616.txt> (дата обращения: 21.07.2022).

Д. Н. Бирюков,
доктор технических наук, доцент;
А. С. Дудкин,
кандидат технических наук;
О. О. Захаров

СПОСОБ ТЕСТИРОВАНИЯ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ МНОГОВАРИАНТНОЙ ГЕНЕРАЦИИ ИСХОДНОГО КОДА ПО ЗАДАННОЙ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СПЕЦИФИКАЦИИ

Рассмотрено применение генерации исходного кода для тестирования средств защиты информации. Проанализированы подходы для автоматизации создания программного обеспечения, и предложен новый подход, учитывающий особенности разработки прототипов программных модулей, применимых для тестирования средств защиты информации. На основе предложенного подхода реализовано решение, которое показало работоспособность в лабораторных условиях.

Ключевые слова: защита информации, вредоносное программное обеспечение, компьютерные атаки, генерация исходного кода, информационная безопасность.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема создания и распространения вредоносных программ по всему миру является серьезным препятствием на пути организации защищенных информационно-телекоммуникационных систем, поскольку злоумышленники регулярно обновляют способы обхода средств защиты информации, дорабатывают вредоносное программное обеспечение (ПО), что позволяет им избегать обнаружения и успешно атаковать компьютерные сети. Зачастую достаточно незначительных изменений в исходном коде для того, чтобы средства защиты перестали детектировать опасное ПО. Изменяются вызываемые функции, строки и некоторые другие элементы, но при этом функциональная спецификация не подвергается изменению. Сравнительно давно существуют организации и институты (например, AV-TEST [1], AV-COMPARATIVES [2]), которые тестируют средства защиты информации на способность обнаруживать актуальные угрозы, как известные, так и потенциально возможные в будущем. В данной статье рассматривается применение генерации исходного кода на основе функциональной спецификации для автоматизации многовариантного создания моделей программного обеспечения в целях тестирования и обучения различных средств защиты информации.

ОБЗОР LOW-CODE ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Одним из наиболее популярных инструментов для автоматизации разработки являются low-code платформы, поскольку позволяют запускать новые решения в короткий срок, значительно сокращать затраты на разработку программного обеспечения. Так, в 2021 году рынок корпоративных low-code технологий вырос на 23%, что подтверждает востребованность в подобных инструментах [3]. При этом low-code платформы не требуют оператора – высококвалифицированного специалиста, что позволяет в кратчайшие сроки обучить пользователей реализовывать проекты без участия профессионалов.

Большинство инструментов на основе low-code подхода предназначены для решения задач, связанных с созданием сайтов, чат-ботов, CRM-систем и др. [4]. Существующие ин-

струменты не соответствуют необходимым требованиям для решения задач, связанных с созданием прототипов потенциально вредоносного программного обеспечения, которые после необходимой доработки можно было бы использовать для тестирования средств защиты информации. Так, например, они не обладают возможностью добавления компонентов, позволяющих работать с API операционной системы.

По итогам анализа существующего функционала low-code платформ и проблем, возникающих в ходе автоматизации процесса разработки моделей вредоносного ПО, был предложен подход, позволяющий разработчикам повторно использовать исходный код и реализовывать необходимую функциональность программного средства.

В ходе исследований были выдвинуты основные требования к решению проблемы.

1. Возможность хранения фрагментов исходного кода (сниппетов) с описанием их параметров, сред выполнения, аппаратных платформ.
2. Поддержка множества языков программирования.
3. Возможность подключать внешние пакеты со сниппетами и описанием синтаксиса языков программирования.
4. Классификация генерируемого исходного кода по четырем основаниям: языку программирования, архитектуре ЭВМ, среде выполнения и целевой операционной системе;
5. Возможность объединения разработанных спецификаций с другими.

ПОДХОД К МНОГОВАРИАНТНОЙ ГЕНЕРАЦИИ ИСХОДНОГО КОДА НА ОСНОВЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СПЕЦИФИКАЦИИ

Подход предполагает использование парадигм процедурного, функционального и объектно-ориентированного программирования, что является возможным – большинство популярных языков программирования (Java, Python, C++ и др.) поддерживают множество парадигм.

В основе подхода лежит концепция «пакетов» – специальных файлов, в которых описываются функции, их параметры, реализации исходного кода, возможные коды ошибок и типы исключений, импорты и другая необходимая для генерации информация. Пакеты подразделяются на языковые (синтаксические) и функциональные. Языковые пакеты предназначены для поддержки языков программирования, в них описываются базовые синтаксические конструкции – циклы, условия и др., правила работы с ними для механизма генерации. Вне зависимости от предназначения пакеты представляются в формате JSON (JavaScript Object Notation), что удобно читать и понимать людям, быстро разбирать и генерировать программному обеспечению.

Для описания функциональной спецификации программного средства используется специальный файл-спецификация, в котором содержится информация о проекте, описание, используемые функции, пакеты, аргументы проекта и функций, а также другая необходимая информация. Файл-спецификация описывается также в формате JSON.

При создании механизма генерации необходимо учитывать множество факторов (разное количество параметров у функций в различных языках программирования, отличающиеся зависимости и др.), усложняющих задачу создания подобного механизма. Для понимания сути проблемы, для примера, был проведен анализ функций создания сокета, подключения к серверу, отправки и получения данных в пяти популярных языках программирования: C, C++, C#, Go. В табл. 1 приведены примеры реализации указанных функций. Сниппеты исходного кода получены из открытых источников при помощи сервиса *GitHub*.

В ходе исследований были сформулированы ряд ограничений и допущений.

1. Необходимо учитывать различные вариации способов подключения модулей, заголовков к исходному коду.
2. Количество параметров в блоке должно соответствовать количеству уникальных параметров из всех реализаций.

3. Константные выражения следует унифицировать.
4. Для обеспечения работоспособности программы необходимо учитывать как коды ошибок, так и исключения.
5. Механизм генерации должен верно обрабатывать ситуации, когда требуемая реализация блока на указанном языке программирования отсутствует.
6. Требуется поддержка «сырого кода» (*rawcode*) для ситуаций, когда по различным причинам невозможно реализовать функциональность существующими описаниями.

Таблица 1

Примеры описания функций на C/C++, C#, Go

Функции	C/C++	C#	Go
Создание сокетa	Импорты		
	<code>#include <ws2tcpip.h></code> <code>#pragma comment (lib, "Ws2_32.lib")</code>	<code>using System.Net;</code> <code>using System.Net.Sockets;</code>	<code>import("net")</code>
	Код		
	Необходима инициализация Winsock <code>Socket name = socket(ai_family, ai_socktype, ai_protocol);</code>	<code>Socket sender = new Socket(AddressFamily, SocketType, ProtocolType);</code>	<code>conn, err := net.Dial(protoType, Host+":"+Port)</code>
	Ошибки		
	<code>name == INVALID_SOCKET</code>	Отсутствуют	В переменной <i>err</i> содержится код ошибки
Количество параметров			
	4	4	5
Подключение	<code>result = connect(name, addr, addrlen);</code> <code>addr</code>	<code>name.connect(ip, port)</code>	Отсутствует, только создание и подключение
	В переменной <i>result</i> содержится код ошибки 4 (<i>addr</i> – IP и порт)	<code>SocketException</code>	Отсутствуют
		3	Отсутствуют
Отправка данных	<code>result = send(name, data, data_size, flags);</code> <code>result == SOCKET_ERROR</code>	<code>name.Send(data, datasize, flags)</code> <code>SocketException, ObjectDisposedException</code> и другие [5]	<code>n, err := name.Write(buf[] byte)</code> В переменной <i>err</i> содержится код ошибки
	4	3	4
Получение данных	<code>result = recv(name, buffer, buffer_size, flags);</code> В переменной <i>result</i> содержится код ошибки	<code>name.Receive(buffer, buffer_size, flags)</code> <code>SocketException, ObjectDisposedException</code> и другие [6]	<code>n, err := name.Read(buf[] byte)</code> В переменной <i>err</i> содержится код ошибки
	4	3	4

Для описания подхода сформулируем следующие понятия.

1. *Блок* – структура с различными реализациями функциональности, описанием параметров, необходимых зависимостей, допустимых архитектур (как аппаратных, так и программных), возможных ошибок и способов их обработки.
 2. *Блок-комбинатор* – блок, ссылающийся на другие блоки в области видимости одного пакета.
 3. *Пакет* – набор блоков, позволяющий реализовывать определенную функциональность.
 4. *Файл-спецификация* – структура с описанием функциональной спецификации программного средства, изменяемых параметров, использованных пакетов.
- Рассмотрим структуру блока (рис. 1).

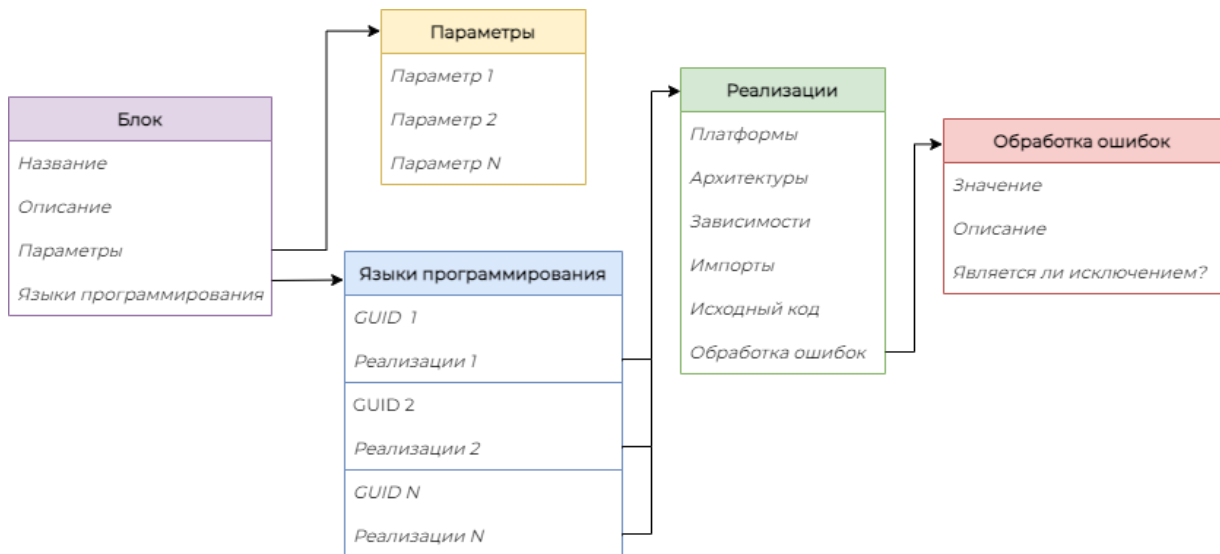


Рис. 1. Структура блока

Ниже приведен пример блока для создания сокета на языке C++:

```
{
  "name": "create_socket",
  "description": "Создает сокет с заданными параметрами",
  "parameters": ["name", "family", "socktype", "protocol"],
  "languages": [
    {
      "guid": "7f0c4fdc-8c55-4a57-a4f1-ab66c6caac1c",
      "implementations": [
        {
          "platforms": ["e19da432-9822-460e-9ca8-a0d35837be52"],
          "arch": ["any"],
          "dependencies": ["any"],
          "imports": [
            "#include <ws2tcpip.h>",
            "#pragma comment(lib, \"Ws2_32.lib\")"
          ],
          "source": [
            "WORD version = MAKEWORD(2, 2);",
            "WSADATA wsaData;",
            "WSAStartup(version, &wsaData);",
            "SOCKET {name} = socket({family}, {socktype}, {protocol});"
          ],
          "errors": [
            {
              "value": "{name} == INVALID_SOCKET",
              "description": "Ошибка при создании сокета",
              "exception": false
            }
          ]
        }
      ]
    }
  ]
}
```

Блок-комбинатор структурно похож на блок, но вместо поля «Языки программирования» используется поле «Блоки» для указания, какие блоки требуется использовать.

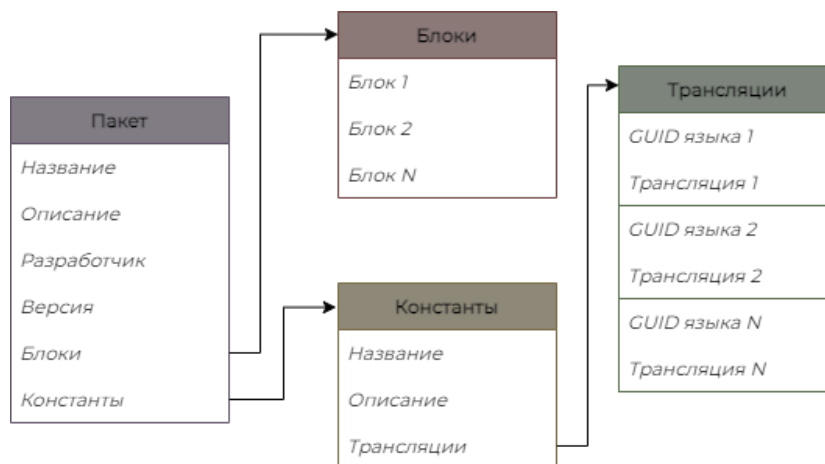


Рис. 2. Структура пакета

Все блоки объединяются в пакеты, которые имеют структуру, показанную на рис. 2.

Особое внимание было уделено реализации трансляции констант, поскольку в различных языках программирования одинаковые значения именуется по-разному:

```

{
  "name": "TCP",
  "description": "Указывает на использование протокола TCP",
  "translations": [
    {
      "lang_guid": "7f0c4fdc-8c55-4a57-a4f1-ab66c6caac1c",
      "translation": "IPPROTO_TCP"
    },
    {
      "lang_guid": "f159fb5c-8083-4782-85db-f2142d0ac206",
      "translation": "ProtocolType.Tcp"
    }
  ]
}

{
  "name": "STREAM",
  "description": "Потоковый сокет",
  "translations": [
    {
      "lang_guid": "7f0c4fdc-8c55-4a57-a4f1-ab66c6caac1c",
      "translation": "SOCK_STREAM"
    },
    {
      "lang_guid": "f159fb5c-8083-4782-85db-f2142d0ac206",
      "translation": "SocketType.Stream"
    }
  ]
},
{
  "name": "IPV4",
  "description": "Для взаимодействия по протоколу IPV4",
  "translations": [
    {
      "lang_guid": "7f0c4fdc-8c55-4a57-a4f1-ab66c6caac1c",

```

```

"translation": "AF_INET"
  },
  {
"lang_guid": "f159fb5c-8083-4782-85db-f2142d0ac206",
"translation": "AddressFamily.InterNetwork"
  }
  ]
}
]

```

Последним рассматриваемым понятием является файл-спецификация. Генератор исходного кода программного средства воспринимает его как определенную последовательность инструкций (рис. 3).

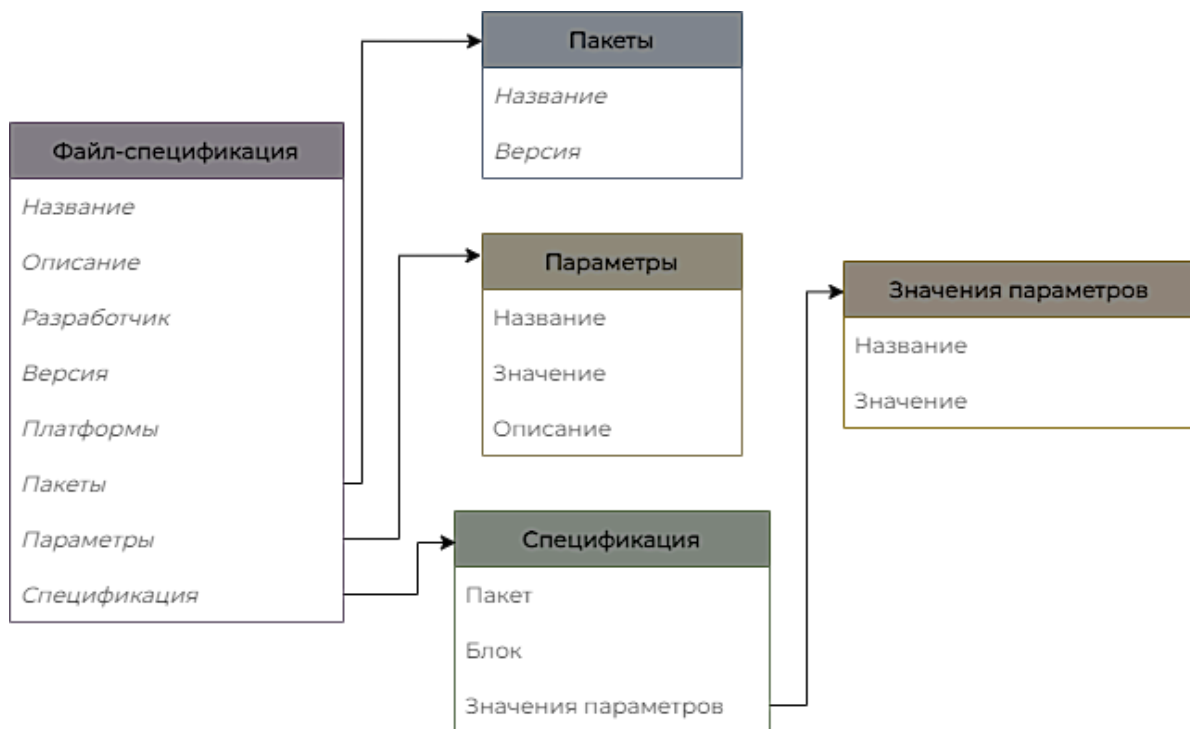


Рис.3. Структура файла-спецификации

Генератор исходного кода различает конструкции:

- 1) {имя_замены} – заменяет конструкцию на соответствующие значения аргументов из блоков в спецификации;
- 2) [имя_замены] – заменяет конструкцию на соответствующее значение из аргументов проекта;
- 3) (имя_константы) – заменяет конструкцию на константу в соответствии с заданными параметрами генерации.

Кроме вышеперечисленных конструкций генератор позволяет использовать ключевое слово «*any*» для выполнения требований к генерируемому коду. Оно позволяет использовать реализацию блока без явного указания языка программирования, среды выполнения и других параметров.

В качестве примера файла-спецификации рассмотрим программу, которая должна создавать сокет, подключаться к серверу и отправлять строку *TRAFFICEXAMPLE*. Кроме того, алгоритм генерации должен подключить другой проект, где реализована функция подключения – это показывает гибкость предлагаемого подхода, так как существует возможность ссылаться уже на разработанные файлы-спецификации:

```

{
  "project": "Пример проекта для генера-
  ции",
  "description": "",
  "developer": "dev_1",
  "version": "0.1.0",
  "platforms": ["e19da432-9822-460e-
  9ca8-a0d35837be52"],
  "packages": [
    {
      "package": "transport",
      "version": "0.1.0"
    }
  ],
  "parameters": [
    {
      "name": "address",
      "value": "\"127.0.0.1\"",
      "description": "IP"
    },
    {
      "name": "port", "value": "\"80\"",
      "description": "port"
    }
  ],
  "specification": [
    {
      "package": "syntax",
      "block": "entry_point",
      "parameters": [],
    },
    {
      "package": "transport",
      "block": "create_socket",
      "parameters": [
        {
          "name": "name", "value": "socket_t"
        }
      ],
      {
        "name": "family", "value": "(IPv4)"
      },
      {
        "name": "socktype",
        "value": "(STREAM)"
      },
      {
        "name": "protocol",
        "value": "(TCP)"
      }
    ]
  ],
}

```

```

{
  "package": "project",
  "path": "\\example_project\\example_secon-
  d.json",
  "parameters": [
    {
      "name": "result",
      "value": "int res"
    },
    {
      "name": "sockname", "value": "socket_t"
    },
    {
      "name": "address", "value": "[address]"
    },
    {
      "name": "port", "value": "[port]"
    }
  ],
  {
    "package": "transport",
    "block": "send",
    "parameters": [
      {
        "name": "result", "value": "sendres"
      },
      {
        "name": "socket", "value": "socket_t"
      },
      {
        "name": "data",
        "value": "\"TRAFFICEXAMPLE\""
      }
    ]
  },
  {
    "package": "syntax",
    "block": "end_if_loop",
    "parameters": []
  },
  {
    "package": "none",
    "lang_guid": "f159fb5c-8083-4782-85db-
    f2142d0ac206",
    "code": "}"
  }
]
}

```

ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕДЛОЖЕННОГО ПОДХОДА ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ

Предложенный подход и разработанный на его основе инструмент могут использоваться для создания моделей вредоносного программного обеспечения с целью обучения и тестирования средств защиты информации. Объединяя тактические и операционные данные об угро-

зах (*ThreatIntelligence*), можно добиться непрерывного анализа возможностей средств защиты информации по обнаружению актуальных угроз. Имена мьютексов, файлов и другие индикаторы компрометации являются тактическими данными, а данные об используемых злоумышленниками процедурах, например о способе запуска полезной нагрузки, – операционными.

Рассмотрим пример решаемой задачи с использованием матрицы тактик, техник, процедур *MITREATT&CK* [7], приведенный на рис. 4.

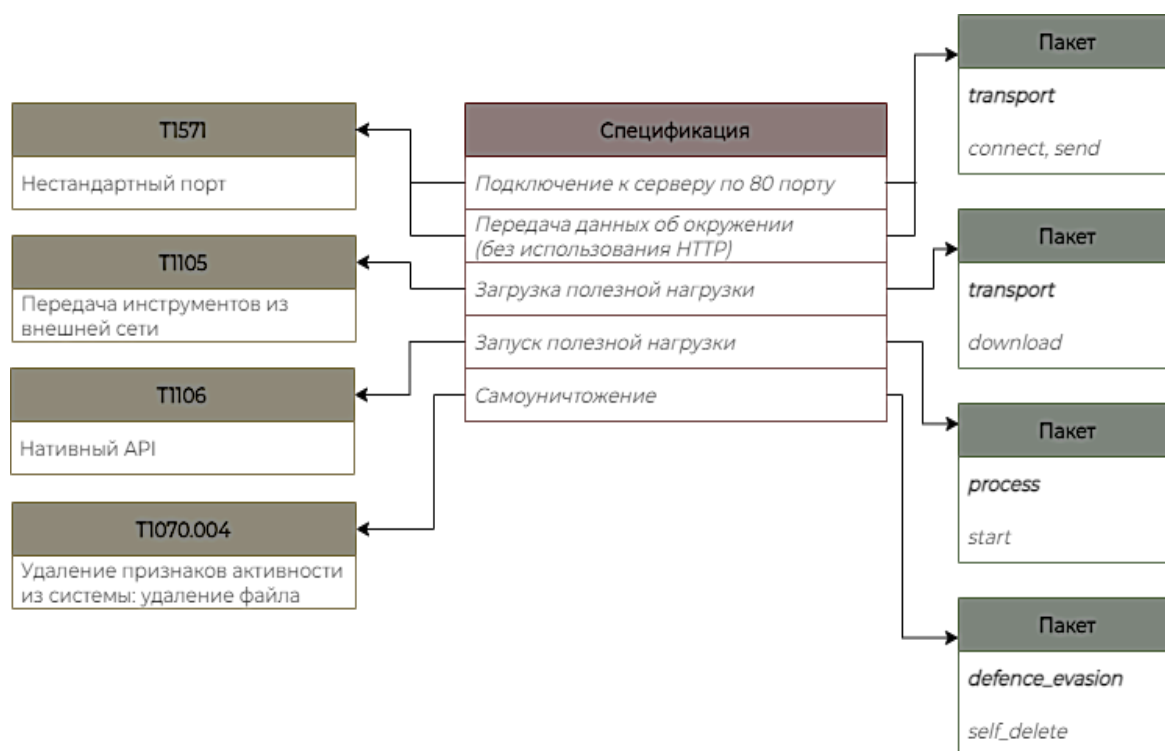


Рис. 4. Пример модели вредоносного программного обеспечения

Сгенерированный исходный код далее был скомпилирован и запущен на рабочей станции под управлением *Windows 11* с установленным *KasperskyTotalSecurity*. Средство защиты среагировало на прототип вредоносного ПО и выдало вердикт *PDM:Trojan.Win32.Generic* о том, что означает обнаружение при помощи поведенческого анализа. В ходе изменения эталонной функциональной спецификации было установлено, что подозрительным является самоуничтожение файла (рис. 5).

Оранжевым выделен код, соответствующий функциональности самоуничтожения приложения, синим – подключение к тестовому серверу. Именно данная комбинация блоков являлась наиболее подозрительной для средства защиты информации. Кроме того, загрузка и запуск полезной нагрузки не вызывают реакции. Это связано с тем, что при тесте использовалось легитимное ПО для администрирования компьютерных сетей.

Предложенный подход позволяет пользоваться высокоуровневыми понятиями (рис. 6), например, проверить, является ли окружение виртуализированным, вместо того чтобы описывать процесс проверки определенных ключей реестра, процессов и других особенностей реализации. Вместе с тем это ускоряет процесс разработки модели, поскольку не требуется разбираться в множестве особенностей, требований для использования функций. Достаточно собрать требуемую спецификацию и указать язык программирования, архитектуру, зависимости (например, библиотеки *MSVC*), целевую ОС.

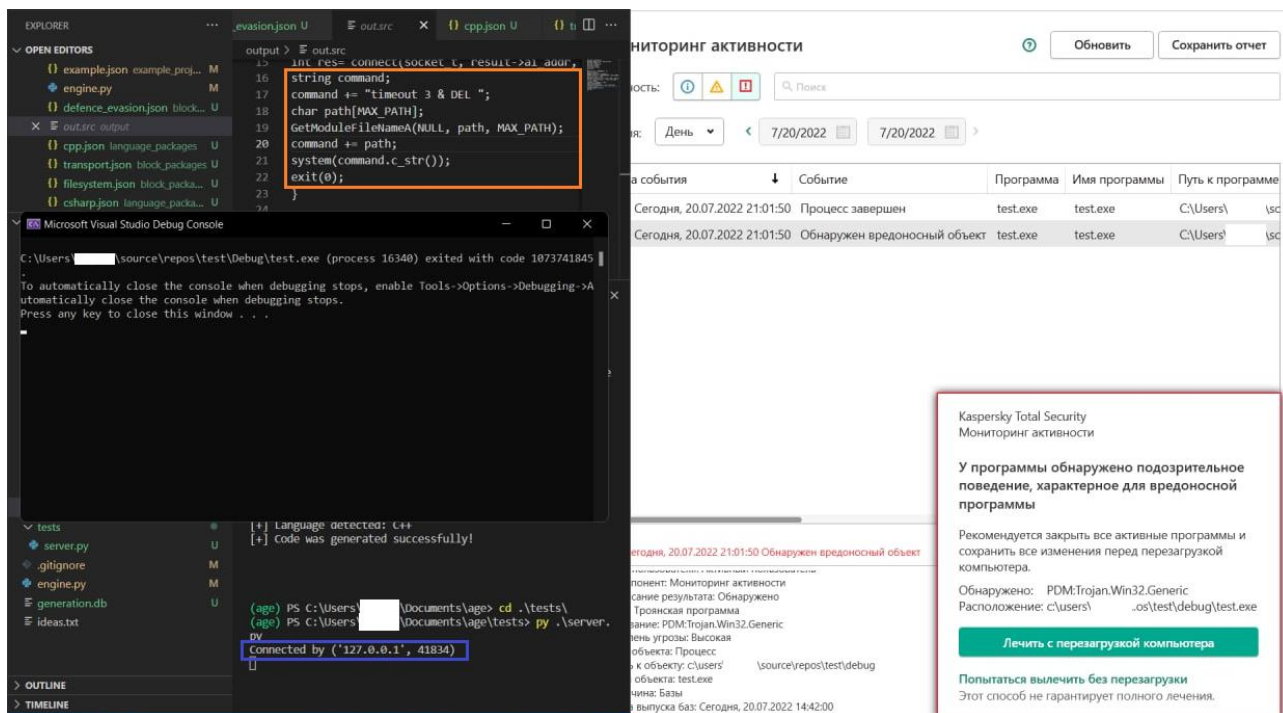


Рис. 5. Обнаружение средством защиты прототипа вредоносного ПО



Рис. 6. Использование высокоуровневых конструкций в функциональной спецификации

Разработчики имеют возможность создавать свои собственные блоки, пакеты для всевозможных целей и тем самым могут ускорять разработку прототипов и моделей различного ПО.

Следует отметить, что в ряде случаев, если компилятор выдает ошибки или его поведение не соответствует предъявляемым разработчиками требованиям, необходимо доработать полученный код вручную.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа текущих задач и проблем в области компьютерной безопасности, связанных с обеспечением безопасного функционирования информационно-телекоммуникационных систем, а также инструментов для автоматизации разработки, авторами был предложен подход к тестированию средств защиты информации. Этот подход разработан на основе осуществления многовариантной генерации прототипов, имитирующих работу вредоносного программного обеспечения.

Полученные результаты могут быть использованы для улучшения качества детектирования угроз различных типов существующими средствами защиты информации, а также при создании новых средств защиты, позволяющих обнаруживать сложные образцы потенциально вредоносного программного обеспечения, ранее не встречавшиеся «вживую» (in the wild).

Список используемых источников

1. AV-TEST: официальный сайт. – URL: <https://www.av-test.org/en/> (дата обращения: 29.06.2022).
2. AV-Comparatives: официальный сайт. – URL: <https://www.av-comparatives.org/consumer/> (дата обращения: 29.06.2022).
3. Gartner Forecasts Worldwide Low-Code Development Technologies Market to Grow 23% in 2021: официальный сайт. – URL: <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2021-02-15-gartner-forecasts-worldwide-low-code-development-technologies-market-to-grow-23-percent-in-2021> (дата обращения: 29.06.2022).
4. Terrasoft: официальный сайт. – URL: <https://www.terrasoft.ua/page/ru/low-code> (дата обращения: 29.06.2022).
5. Microsoft: официальный сайт. – URL: <https://docs.microsoft.com/ru-ru/dotnet/api/system.net.sockets.socket.send?view=net-6.0> (дата обращения: 29.06.2022).
6. Microsoft: официальный сайт. – URL: <https://docs.microsoft.com/ru-ru/dotnet/api/system.net.sockets.socket.receive?view=net-6.0> (дата обращения: 29.06.2022).
7. Матрица MITRE ATT&CK: официальный сайт компании Positive Technologies. – URL: <https://mitre.ptsecurity.com/> (дата обращения: 29.06.2022).

Д. А. Лесняк,
кандидат технических наук;
Г. Н. Мальцев,
доктор технических наук, профессор;
С. А. Матвеев

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ СТОЙКОСТИ СИММЕТРИЧНЫХ КРИПТОГРАФИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ

Представлен методический подход к анализу стойкости симметричных криптографических алгоритмов. Подход основан на оценке вычислительной сложности их криптоанализа. Он ориентирован на использование при поддержании защищенности информации в информационно-телекоммуникационных системах на базе прогнозирования ее изменения и периодической смены параметров используемого криптографического алгоритма. Вычислительная сложность криптоанализа рассматривается применительно к методам направленного перебора ключей шифрования, являющимся основными при криптоанализе симметричных криптографических алгоритмов. Рассмотрены особенности определения числа операций перебора, определяющего среднее время преодоления защиты при криптоанализе. Представлен пример использования оценки среднего времени преодоления защиты при управлении сменой долгосрочных ключей шифрования для поддержания требуемого уровня защищенности информации.

Ключевые слова: симметричные криптографические алгоритмы, криптоанализ, вычислительная сложность, управление ключами шифрования.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время проблема защиты информации затрагивает практически все сферы деятельности человека. Развитие и повсеместное внедрение современных информационных технологий передачи, хранения и обработки информации создают предпосылки для нарушений ее безопасности. В информационно-телекоммуникационных системах основным способом обеспечения конфиденциальности информации, как основной составляющей ее безопасности, является ее криптографическая защита [1–4]. Для защищенной передачи информации по каналам (направлениям) связи широкое распространение получают симметричные (одноключевые) криптографические алгоритмы шифрования, использование которых в ряде случаев регламентировано. Так, основным действующим в Российской Федерации стандартом шифрования данных для информационно-телекоммуникационных систем является симметричный криптографический алгоритм блочного шифрования, который определяется ГОСТ 34.12-2018 [5].

Обеспечение защиты информации, в том числе криптографическими методами, связано с оценкой текущего уровня защищенности информации, по результатам которой осуществляется управление параметрами системы защиты информации (СЗИ) [1, 6]. Это обусловлено объективным снижением защищенности информации при накоплении нарушителем данных об информационно-телекоммуникационной системе и непрерывном ведении им криптоанализа. При передаче информации с использованием симметричных криптографических алгоритмов изменяемыми параметрами СЗИ являются вскрываемые при криптоанализе долгосрочные ключи шифрования [3, 7, 8]. Для поддержания требуемого уровня защищенности передаваемой информации необходима их периодическая смена. Предполагается, что при смене ключей шифрования СЗИ возвращается в полностью защищенное состояние. В настоящей статье представлен методический подход к анализу стойкости симметричных криптографических алгоритмов, основанный на оценке вычислительной сложности их криптоанализа. По результатам такой оценки может выбираться периодичность смены ключей шифрования для поддержания требуемого уровня защищенности информации.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СТОЙКОСТЬ КРИПТОГРАФИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЗАЩИЩЕННОСТИ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИИ

Криптографические методы защиты информации представляют собой специальные методы преобразования информации, в результате применения которых ее содержание становится недоступным без предъявления некоторого параметра криптографического алгоритма преобразования (ключа шифрования) и обратного преобразования. Ключом является секретное состояние одного или нескольких параметров криптографического алгоритма преобразования защищаемой информации (данных). Криптографический алгоритм представляет собой набор математических правил, определяющих содержание и последовательность выполнения зависящих от ключа шифрования операций по преобразованию исходных открытых данных к зашифрованным, а также, наоборот, – по расшифрованию зашифрованных данных. Стойкость криптографических алгоритмов к их расшифровыванию посторонним лицом (нарушителем) базируется на том, что ключ шифрования не должен быть ему известен, а без знания ключа расшифрование зашифрованных данных является вычислительно сложной задачей.

Стойкость (криптостойкость) является основной характеристикой криптографических алгоритмов. Она определяется как мера сложности наилучшего алгоритма криптоанализа, приводящего с приемлемой вероятностью к успешному раскрытию ключей шифрования и расшифрования сообщений, зашифрованных с использованием анализируемого криптографического алгоритма [8–10]. Криптоанализ может осуществляться статистическими или алгебраическими методами и основываться на использовании как общих математических результатов, так и частных результатов, полученных для конкретного криптографического алгоритма. Направления криптоанализа могут быть различными и могут заключаться как в раскрытии ключей шифрования, так и в нахождении слабостей (уязвимостей) в криптографических алгоритмах. Однако в любом случае криптоанализ в конечном итоге направлен на осуществление несанкционированного доступа (НСД) нарушителя к зашифрованной информации.

При оценке стойкости криптографических алгоритмов в соответствии с принципом Киркхоффа предполагается, что сам криптографический алгоритм известен с точностью до его секретных параметров [7, 8]. Стойкость криптографических алгоритмов рассматривается с теоретической (совершенной) и практической (вычислительной) точек зрения. При рассмотрении совершенной криптостойкости определяется, насколько надежна некоторая криптографическая система защиты информации, если криптоаналитик не ограничен временем и обладает всеми необходимыми средствами для криптоанализа зашифрованных сообщений. В теории криптографии показано, что для большинства практических применений объем ключа для построения теоретически стойкого совершенного шифра недопустимо велик [8, 9]. Поэтому практический интерес представляет определение вычислительной стойкости криптографических алгоритмов. При рассмотрении вычислительной стойкости определяется, надежен ли некоторый криптографический алгоритм, если криптоаналитик располагает ограниченным временем и доступными ему вычислительными возможностями для анализа зашифрованных сообщений.

Вычислительная стойкость криптографических алгоритмов определяется вычислительной сложностью их криптоанализа – числом операций и объемом памяти, необходимыми для раскрытия зашифрованного сообщения без знания ключа [8, 11]. Реальное время вскрытия криптографического алгоритма во всех случаях зависит от наличия у криптоаналитика исходной информации и от производительности ЭВМ, с помощью которой он проводит криптоанализ. При различных вычислительных возможностях криптоаналитика данное количество операций может быть выполнено за разное время. Поэтому для оценки реального времени вскрытия криптографического алгоритма необходимо знать реальные вычислительные возможности (мощности), которые криптоаналитик может использовать для проведения

криптоанализа. Для гарантированной оценки следует исходить из предположения, что криптоаналитик применяет самую мощную доступную ему вычислительную технику и с течением времени накопит достаточную для криптоанализа информацию.

Анализ вычислительной стойкости криптографических алгоритмов необходим для прогнозирования изменения текущей защищенности информации при их использовании и периодической смены ключей шифрования используемого криптографического алгоритма. В рамках подхода к оценке защищенности информации при ее криптографической защите на основе теории надежности [12, 13] предполагается, что при смене ключей шифрования в СЗИ информационно-телекоммуникационная система возвращается в полностью защищенное состояние. Чтобы гарантировать требуемый уровень защищенности информации, необходимые изменения в СЗИ должны проводиться через определенный интервал времени, выбираемый исходя из допустимого снижения вероятности обеспечения защищенности информации при правильном функционировании средств защиты. Этот интервал времени выбирается на основе прогнозирования изменения защищенности информации в условиях ожидаемых воздействий (атак) нарушителя и попыток осуществления НСД к зашифрованной информации.

На практике используются две основные стратегии обеспечения защищенности информации в информационно-телекоммуникационных системах – на основе адаптации к текущим угрозам информационной безопасности и на основе прогнозирования защищенности информации [1, 14].

На рис. 1 представлена логическая схема, характеризующая функционирование СЗИ с настройкой (сменой) ее параметров на основе прогнозирования защищенности. По своему характеру данная стратегия является упреждающей и направлена на недопущение реализации угроз информационной безопасности. За счет соответствующего выбора математических моделей, используемых при прогнозировании, обеспечиваются возможность аналитического расчета достижимых вероятностных характеристик уровня защищенности информации на интересующих интервалах времени и задание критериев снижения ее уровня.

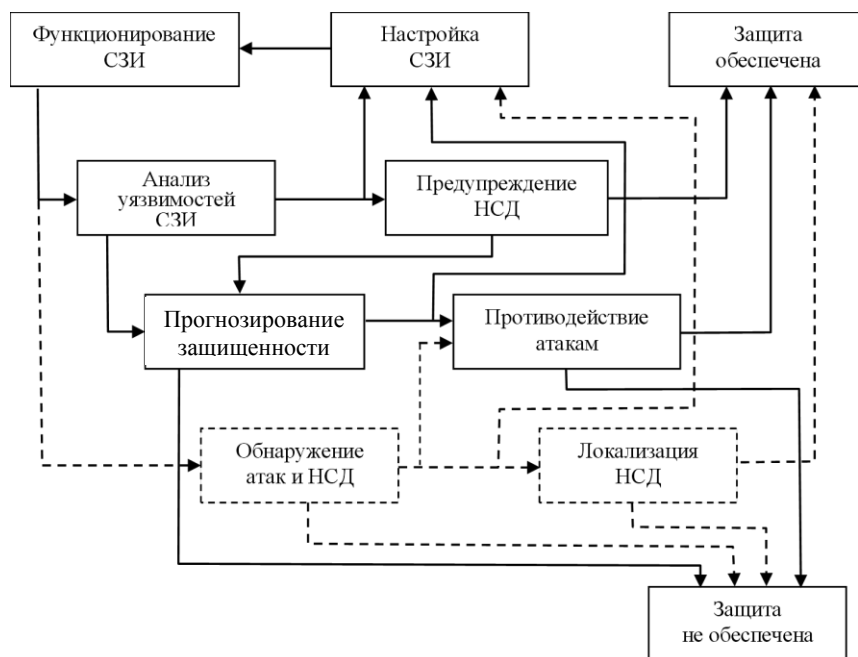


Рис. 1. Стратегия поддержания защищенности на основе ее прогнозирования

Для обеспечения требуемого уровня защищенности информации реализуются три этапа защиты информации:

- 1) анализ уязвимостей СЗИ, обеспечивающий обнаружение предпосылок и предупреждение НСД к защищаемой информации;
- 2) прогнозирование защищенности, обеспечивающее противодействие НСД и реализации ожидаемых угроз информационной безопасности;
- 3) обнаружение атак и НСД, обеспечивающее его локализацию и восстановление требуемого уровня защищенности информации.

Результатом функционирования СЗИ является защищенное (защита обеспечена) или незащищенное (защита не обеспечена) состояние информационной системы. Требуемое качество функционирования СЗИ на всех трех указанных этапах определяется характеристиками используемых средств защиты, возможностями управления СЗИ и точностью прогнозирования ожидаемого изменения защищенности информации в условиях ожидаемых атак нарушителя, направленных на реализацию угроз информационной безопасности. Первые два этапа защиты информации являются основными. По результатам анализа уязвимости СЗИ и прогнозирования защищенности информации определяется требуемая периодичность настройки СЗИ, которая, как правило, осуществляется по календарному принципу. Третий этап защиты информации необходим в дополнение к первым двум этапам при наличии тех или иных возможностей обнаружения атак и фактов НСД к защищаемой информации.

При криптографической защите информации прогнозирование ее защищенности осуществляется на основе анализа вычислительной стойкости используемых криптографических алгоритмов, а настройка параметров СЗИ состоит в смене ключей шифрования информации. Тем самым СЗИ противостоит криптоанализу, направленному на вскрытие используемых на текущем интервале времени ключей шифрования и осуществление НСД к передаваемой информации. Рассмотрим методический подход к оценке стойкости симметричных криптографических алгоритмов блочного шифрования, широко используемых для защищенной передачи информации по каналам связи информационно-телекоммуникационных систем.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СТОЙКОСТИ СИММЕТРИЧНЫХ КРИПТОГРАФИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ

Симметричные (одноключевые) криптографические алгоритмы блочного шифрования широко используются в информационно-телекоммуникационных системах для защищенной передачи информации по каналам связи. Их использование в ряде случаев регламентировано, а смена ключей шифрования, как правило, производится по календарному принципу.

Большинство современных симметричных криптографических алгоритмов блочного шифрования основаны на использовании многократных (многократных) подстановочно-перестановочных операций над блоками данных (сообщений) фиксированной разрядности (длины). В процессе преобразований используются долговременные и оперативные ключи шифрования, входящие в таблицы замен (подстановок) и являющиеся секретными параметрами алгоритма. По одному из первых блочных симметричных криптографических алгоритмов такого типа – по американскому алгоритму *DES (Data Encryption Standard)* – такие алгоритмы получили название *DES-подобных*.

Использование в *DES-подобных* криптографических алгоритмах многократных подстановочно-перестановочных операций приводит к тому, что в качестве основных методов криптоанализа симметричных криптографических алгоритмов в большинстве случаев рассматриваются методы направленного перебора [4, 8, 10]. При этом направленный характер перебор приобретает по мере появления дополнительной информации и промежуточных результатов криптоанализа, а на начальном его этапе и при криптоанализе новых криптографических алгоритмов, информация по которым еще не накоплена, используется прямой перебор («метод грубой силы»). Переборные методы являются универсальными, их неоспоримое достоинство

заключается в том, что рано или поздно искомый ключ будет найден и для этого будет необходим минимальный набор данных.

В предположении проведения криптоанализа переборными методами оценка вычислительной стойкости симметричных криптографических алгоритмов и прогнозирование защищенности информации при их использовании включают:

- определение теоретической размерности задачи перебора при криптоанализе анализируемого криптографического алгоритма и возможностей ее снижения с использованием дополнительной информации;

- оценка предполагаемой производительности вычислительных средств, имеющихся в распоряжении криптоаналитика, и скорости выполнения вычислительных операций;

- задание модели изменения защищенности информации при ведении криптоанализа, направленного на осуществление НСД нарушителя к зашифрованной информации.

Теоретическая размерность задачи перебора при криптоанализе симметричного криптографического алгоритма определяется длиной ключа шифрования L . Общее число операций перебора всех ключей составляет 2^L , причем число операций до нахождения искомого ключа является случайным. Если в качестве оценки числа операций, необходимых для вскрытия ключа шифрования при прямом переборе, взять математическое ожидание случайной величины, соответствующей числу операций до вскрытия ключа, то получаем $N_{on}=2^{L-1}$ операций.

Длина ключа шифрования исходного алгоритма *DES* составляла $L=56$ бит, а современные отечественный алгоритм (ГОСТ 34.12-2018) и американский алгоритм *AES* (*Advanced Encryption Standard*) имеют режимы работы с длиной ключа $L=128$ бит и $L=256$ бит [5, 15]. Оценка среднего числа операций полного перебора, определяющая размерность задачи криптоанализа для такой длины ключей, составляет: $N_{on}=2^{55}$, $N_{on}=2^{127}$ и $N_{on}=2^{255}$ соответственно. Эта оценка требуемого числа операций характеризует теоретическую вычислительную стойкость указанных криптографических алгоритмов. На основании существенного увеличения числа операций перебора N_{on} при длине ключа $L=128$ бит и $L=256$ бит в ряде случаев делается вывод о том, что криптоанализ соответствующего криптографического алгоритма с использованием перебора ключей не имеет практического значения, поскольку требует неприемлемого времени на реализацию [2, 10]. Однако этот вывод не означает отказа от рассмотрения вычислительной стойкости современных криптографических алгоритмов к криптоанализу с использованием переборных методов, по крайней мере, по двум причинам.

Во-первых, имеет место непрерывный рост производительности ЭВМ. В мире создаются суперЭВМ с высокой производительностью, появляется возможность их объединения в Центры обработки данных (ЦОД), а задача поиска ключа шифрования методом полного перебора хорошо распараллеливается и легко может быть реализована на многопроцессорных вычислительных системах. Возможность распараллеливания решения анализируемых задач перебора в сочетании с использованием высокопроизводительных суперЭВМ и ЦОД позволяет значительно ускорить нахождение ключа. Анализ деятельности зарубежных служб криптоанализа показывает, что при необходимости они активно применяют для решения задач криптоанализа вычислительные мощности ЦОД различных ведомств и коммерческих организаций [16]. Кроме того, в мире происходит динамичное развитие квантовых компьютеров. Они изначально рассчитаны на выполнение параллельных вычислений, и в них прогнозируется достижение существенно более высокой производительности, чем производительность современных «классических» вычислителей [17]. Поэтому с развитием квантовых компьютеров интерес к переборным алгоритмам возрастает.

Во-вторых, в современных условиях к защищенности информации критического характера в информационно-телекоммуникационных системах предъявляются жесткие требования, характеризующиеся допустимой вероятностью несанкционированного доступа к информации, зашифрованной криптографическими методами, на уровне от 10^{-10} до 10^{-12} и ниже. Интервалы времени, в течение которых обеспечиваются такие вероятности НСД к информации, ока-

зываются значительно меньше (на десятки порядков), чем среднее время преодоления защиты. В этих условиях оценка величины среднего времени преодоления защиты, значение которой существенно превышает длительность интервалов времени, представляющих практический интерес, позволяет прогнозировать интервал времени, в течение которого обеспечивается требуемая вероятность НСД к информации и имеет реальную продолжительность – месяцы и годы. Это имеет важное практическое значение для поддержания требуемого уровня защищенности информации за счет периодической смены долгосрочных ключей шифрования используемых симметричных криптографических алгоритмов.

В зависимости от решаемых задач для сравнительной оценки вычислительных возможностей ЭВМ в настоящее время применяются различные подходы и критерии [18,19]. При оценке вычислительных возможностей различных ЭВМ с точки зрения проведения криптоанализа основными показателями производительности ЭВМ являются пиковая и реальная производительность, измеряемые в MIPS (*Millions Instruction Per Second*) или FLOPS (*FLoating-point Operations Per Second*) – соответственно числе инструкций или операций с плавающей запятой, выполняемых процессором ЭВМ в единицу времени. Создаваемые в настоящее время мире суперЭВМ характеризуются производительностью 10²⁵–10²⁶ MIPS, возможно объединение таких суперЭВМ в ЦОД с суммарной производительностью 10²⁶–10²⁷ MIPS. Для сравнения, согласно экспертным оценкам, мировая вычислительная мощность ЭВМ составляет по состоянию на 2021 год примерно 10³¹–10³² MIPS, и половина этой вычислительной мощности приходится на суперЭВМ из списка ТОП-500.

На рис. 2 на примере увеличения вычислительных возможностей наилучших ЭВМ, представленных на сайте Проекта ТОП-500 (<http://top500.org>), показаны кривые изменения во времени мировой вычислительной производительности ЭВМ в пико-FLOPS, согласно которым вычислительная мощность увеличивается в восемь раз каждые три года (закон Мура). Кривая 1 соответствует увеличению совокупной производительности ЭВМ из списка ТОП-500, кривая 2 соответствует увеличению производительности ЭВМ, расположенной на первом месте списка ТОП-500, кривая 3 соответствует увеличению производительности ЭВМ, расположенной на последнем месте списка ТОП-500. Из анализа представленных кривых роста мировой вычислительной производительности ЭВМ следует, что для сохранения существующей практической стойкости к криптоанализу методом перебора ключей симметричных криптографических алгоритмов к длине их ключа L необходимо добавлять 3 бита каждые три года [15]. При этом в случае реализации алгоритмов полного перебора на квантовых компьютерах имеет место квадратическое уменьшение числа операций в сравнении обычным полным перебором, что эквивалентно уменьшению длины ключа L в 2 раза.

В зависимости от типа ЭВМ, время, затрачиваемое на одинаковое количество операций, может быть разным, поэтому в качестве основного показателя производительности ЭВМ криптоаналитика следует использовать пиковую производительность процессора ЭВМ. Пиковая производительность процессора, измеренная в MIPS, характеризует скорость работы процессора по выполнению собственных инструкций в миллионах операций в секунду над числами с фиксированной запятой без учета времени обращения к оперативной памяти и к устройствам ввода/вывода. Она определяется как среднестатистическое число инструкций, выполняемых процессором в единицу времени без учета их статистического веса в выбранном классе задач.

Достоинствами использования показателя пиковой производительности ЭВМ является то, что его легко рассчитать по характеристикам процессора и она отражает существо процесса обработки информации. Чем выше быстродействие ЭВМ, тем большим значением показателя пиковой производительности она характеризуется. Под пиковой производительностью многопроцессорной ЭВМ понимают величину, равную произведению пиковой производительности одного процессора на число таких процессоров в системе.

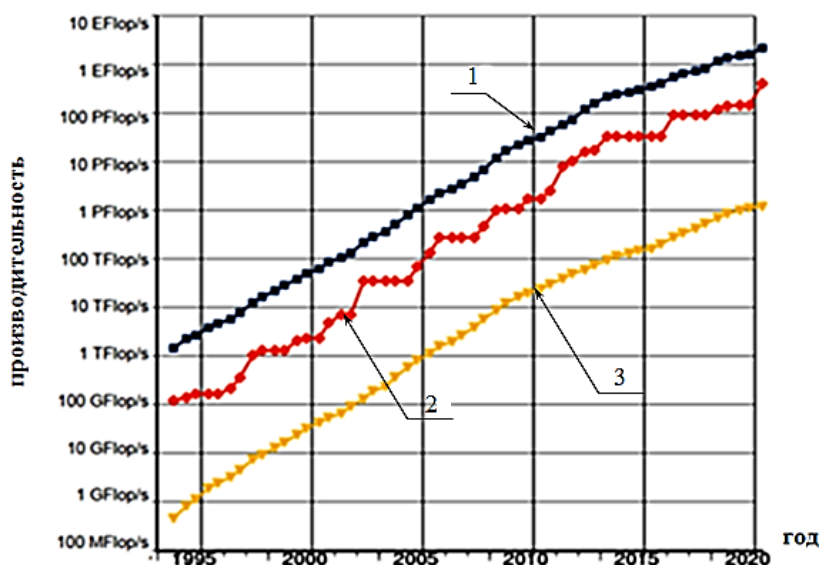


Рис. 2. Изменение во времени мировой вычислительной производительности ЭВМ

При описании процесса поддержания защищенности информации в информационно-телекоммуникационной системе и попыток нарушителя осуществить НСД к зашифрованной информации, как конфликтного взаимодействия [6, 13], время, необходимое для успешного криптоанализа перехваченной зашифрованной информации, характеризуется средним временем преодоления защиты T_{cp} . При непрерывном ведении криптоанализа среднее время преодоления защиты определяется отношением среднего числа операций N_{on} , необходимых для вскрытия криптографического алгоритма, к скорости выполнения вычислительных операций V_{on} ЭВМ криптоаналитика: $T_{cp} = N_{on}/V_{on}$.

При достаточно общих предположениях модель процесса поддержания защищенности информации в условиях угроз информационной безопасности, как конфликтного взаимодействия [14, 20], дает экспоненциальную зависимость от времени вероятности обеспечения информационной безопасности:

$$P_{заш}(t) = \exp(-t/T_{cp}).$$

Полагается, что в момент времени $t=0$ защита обеспечена и $P_{заш}=1$. Тогда время, в течение которого выполняется $P_{заш} \geq P_{заш, доп}$ и вероятность обеспечения информационной безопасности не ниже допустимого значения $P_{заш, доп}$, составляет $T_{заш} = -T_{cp} \ln(1 - P_{заш, доп})$, где величина $(1 - P_{заш, доп})$ может рассматриваться как вероятность несанкционированного доступа к зашифрованной информации $P_{НСД}$. С учетом требований к допустимой вероятности несанкционированного доступа к зашифрованной информации $P_{НСД}$ на уровне 10^{-10} – 10^{-12} и ниже, время обеспечения защиты $T_{заш}$ связано со средним временем преодоления защиты T_{cp} приближенным соотношением $T_{заш}/T_{cp} \approx (1 - P_{НСД})$.

Предлагаемый методический подход к анализу стойкости симметричных криптографических алгоритмов предполагает оценку среднего времени преодоления защиты T_{cp} по среднему числу операций перебора ключей шифрования N_{on} и скорости выполнения вычислительных операций V_{on} . При этом учитываются возможности направленного перебора с использованием дополнительной информации и промежуточных результатов криптоанализа, а также вычислительные возможности проведения криптоанализа. При использовании предлагаемого подхода первоначально определяются среднее число операций и соответствующее ему среднее время преодоления защиты при полном переборе ключей заданной длины и заданной скорости выполнения вычислительных операций. После этого анализируются возможности уменьшения среднего числа операций за счет использования дополнительной информа-

ции и промежуточных результатов криптоанализа и увеличения скорости выполнения вычислительных операций перебора за счет их распараллеливания.

Исходное значение среднего времени преодоления защиты при полном переборе ключей длиной L и скорости выполнения вычислительных операций ЭВМ криптоаналитика V_{on} составляет $T_{cp}=2^{L-1}/V_{on}$, что соответствует $N_{on}=2^{L-1}$ и теоретической вычислительной стойкости анализируемого криптографического алгоритма.

Далее рассматриваются возможности уменьшения числа операций N_{on} за счет направленного перебора и распараллеливания вычислений. При этом учитывается накопленный опыт криптоанализа аналогичных криптографических алгоритмов и известные или экспертные оценки уменьшения среднего числа операций направленного перебора N_{on} при использовании дополнительной информации и промежуточных результатов криптоанализа, а также предполагаемые возможности криптоаналитика по использованию имеющихся в его распоряжении вычислительных мощностей.

Накопленный опыт криптоанализа *DES*-подобных криптографических алгоритмов показывает, что снижение числа операций перебора ключей может быть обеспечено за счет наличия дополнительной информации о так называемых слабых ключах и таблицах замен; накопления информации, зашифрованной на одном и том же долгосрочном ключе, и поиска открытых данных, соответствующих зашифрованным. Кроме того, поиск ключа может быть ускорен специальными методами криптоанализа, ориентированными на конкретный класс криптографических алгоритмов. Для симметричных криптографических алгоритмов блочно-го шифрования такими специальными методами криптоанализа являются линейный криптоанализ, дифференциальный криптоанализ, криптоанализ на основе связанных ключей, «скользящий» криптоанализ и др. [7, 8, 10].

Так, при определенных допущениях относительно используемых методов криптоанализа число операций направленного перебора ключей при криптоанализе алгоритма *DES* оценивается величиной $N_{on}=2^{37}$ при теоретической оценке числа операций прямого перебора $N_{on}=2^{55}$, а при криптоанализе усеченного 24-раундового алгоритма ГОСТ 28147-89 (исходный 32-раундовый алгоритм действовал до стандарта ГОСТ 34.12-2018, в котором определен как один из базовых алгоритмов шифрования) – величиной $N_{on}=2^{54}$ при теоретической оценке операций прямого перебора $N_{on}=2^{127}$ [2]. При криптоанализе *DES*-подобного криптографического алгоритма с длиной ключа $L=256$ бит число операций направленного перебора ключей оценивается величиной $N_{on}=2^{119}$ при теоретической оценке числа операций прямого перебора $N_{on}=2^{255}$ [10, 15]. В рассмотренных случаях за счет учета слабых ключей и таблиц замен и за счет использования методов дифференциального и «скользящего» криптоанализа симметричных шифров достигается уменьшение числа операций перебора, эквивалентное уменьшению длины ключа в 1,5–2,3 раза.

Скорость выполнения вычислительных операций V_{on} для определения среднего времени преодоления защиты T_{cp} задается исходя из предполагаемой производительности ЭВМ криптоаналитика и возможности распараллеливания вычислений. При учете распараллеливания вычислений следует учитывать, что согласно закону Амдала существует предел, ограничивающий максимальное число потоков вычислений, после которого эффективность вычислений перестает расти [21]. Кроме того, при распределении задачи криптоанализа на несколько ЭВМ, суммарная вычислительная мощность будет меньше арифметической суммы вычислительных мощностей отдельных ЭВМ. Однако в целом распараллеливание вычислений при криптоанализе позволяет увеличить скорость выполнения вычислительных операций V_{on} и, соответственно, уменьшить среднее время преодоления защиты T_{cp} на порядок. Полученная оценка среднего времени преодоления защиты T_{cp} может быть использована при решении прикладных задач анализа защищенности информации и управления параметрами СЗИ в информационно-телекоммуникационных системах.

Рассмотрим пример использования результатов оценки среднего времени преодоления защиты T_{cp} при определении периода смены долгосрочных ключей шифрования для поддер-

жания требуемого уровня защищенности информации. Предполагается, что при смене ключей шифрования система защиты информации возвращается в полностью защищенное состояние, в котором $P_{\text{НСД}}=0$. Пусть задаваемый по календарному принципу период смены ключей шифрования составляет $T_{\text{защ}0}$, а период смены ключей шифрования, требуемый с учетом текущего уровня защищенности передаваемой информации и определяемый по среднему времени преодоления защиты $T_{\text{ср}}$ и допустимой вероятности НСД к зашифрованной информации в результате криптоанализа перехваченных сообщений $P_{\text{НСД}}$, составляет $T_{\text{защ}1}$. В качестве типичной ситуации при смене ключей шифрования по календарному принципу полагается период обновления ключей $T_{\text{защ}0}=1$ год.

На рис. 3 представлены зависимости $P_{\text{НСД}}(t)$, иллюстрирующие выигрыш в информационной безопасности при $T_{\text{защ}0}/T_{\text{защ}1} > 1$, которые соответствуют соотношению $T_{\text{защ}0}/T_{\text{защ}1}=3$. Величина $T_{\text{защ}1}$ соответствует условию $P_{\text{НСД}} \leq 10^{-12}$. Момент времени $t=0$ соответствует очередному обновлению параметров алгоритма шифрования. Кривая 1 соответствует использованию одних и тех же ключей шифрования без обновления, кривая 2 – смене ключей шифрования с периодом $T_{\text{защ}0}=1$ год, кривая 3 – смене ключей шифрования с периодом $T_{\text{защ}1}=4$ мес. После прохождения времени $T_{\text{защ}1}$, равного требуемому периоду обновления ключей шифрования, при их смене с периодом $T_{\text{защ}0}$ вероятность НСД к зашифрованной информации $P_{\text{НСД}}$ начинает превышать допустимый уровень 10^{-12} , и соответствующий интервал времени составляет 67% интервала времени $T_{\text{защ}0}$.

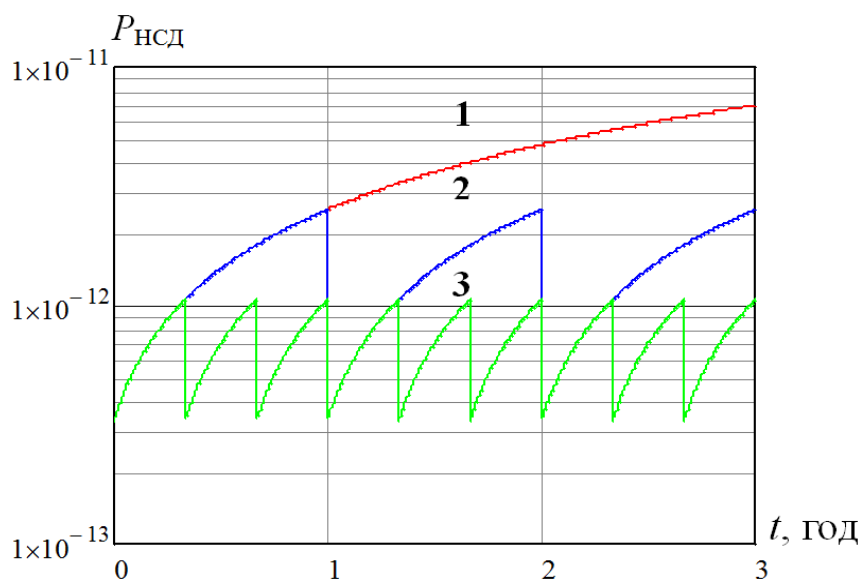


Рис. 3. Изменение во времени вероятности НСД при $T_{\text{защ}0}/T_{\text{защ}1} > 1$.

На рис. 4 представлены зависимости $P_{\text{НСД}}(t)$, которые наглядно показывают ситуацию, когда $T_{\text{защ}0}/T_{\text{защ}1} < 1$, и соответствуют соотношению $T_{\text{защ}0}/T_{\text{защ}1}=0,57$. Величина $T_{\text{защ}1}$ соответствует условию $P_{\text{НСД}} \leq 10^{-12}$. Момент времени $t=0$ — очередному обновлению параметров алгоритма шифрования. Кривая 1 соответствует использованию одних и тех же ключей шифрования без обновления, кривая 2 – смене ключей шифрования с периодом $T_{\text{защ}0}=1$ год, кривая 3 – смене ключей шифрования с периодом $T_{\text{защ}1}=1,75$ года. При обновлении ключей как с периодом $T_{\text{защ}1}$, так и с периодом $T_{\text{защ}0}$ вероятность НСД к зашифрованной информации $P_{\text{НСД}}$ не превышает допустимый уровень 10^{-12} . Однако и в данном случае имеет место положительный эффект при обновлении ключей с периодом $T_{\text{защ}1} > T_{\text{защ}0}$, соответствующим учету текущего уровня защищенности зашифрованной информации. Он состоит в возможности более «экономного» расходования ключей, не отнесенных в результате предшествующего криптоанализа к слабым.

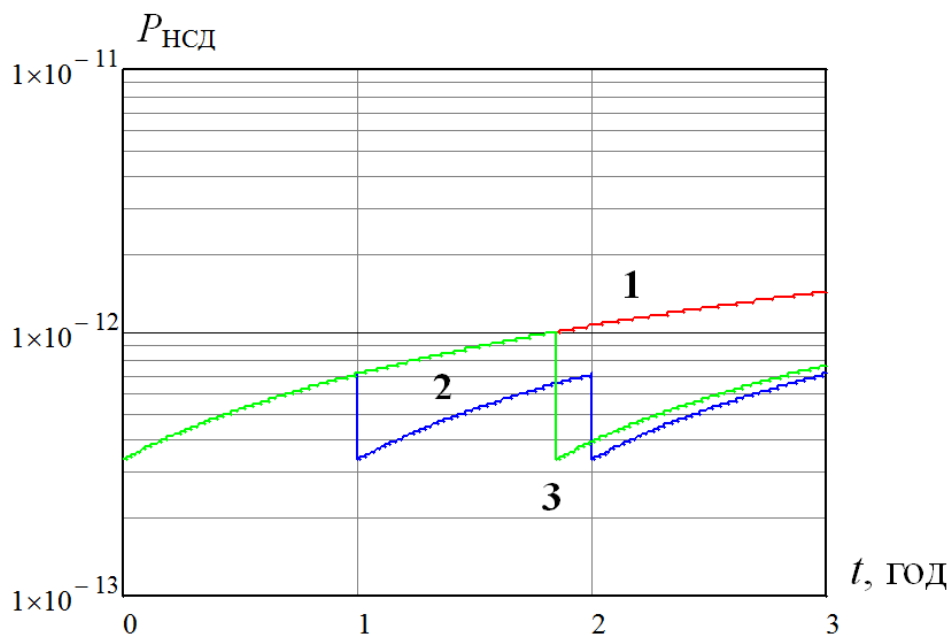


Рис. 4. Изменение во времени вероятности НСД при $T_{защ0}/T_{защ1} < 1$

При значительной мощности ключевого пространства современных симметричных криптографических систем 2^L , определяемой длиной ключа L , фактор «экономного» расходования ключей приобретает значение по следующим причинам.

Во-первых, часть ключей, отнесенных в результате предшествующего криптоанализа к слабым, не используется, поскольку их использование существенно снижает вычислительную стойкость применяемых криптографических алгоритмов. Это приводит к такому же уменьшению мощности ключевого пространства, как и уменьшение числа операций перебора, к эквивалентному уменьшению длины ключа в несколько раз.

Во-вторых, что более существенно, на практике при реализации защищенной передачи информации в информационно-телекоммуникационных системах, как правило, используется централизованное распределение ключей, предполагающее их определенную иерархию [13, 22]. В этой иерархии можно выделить, по крайней мере, три уровня:

- главные ключи (мастер-ключи);
- ключи шифрования ключей;
- рабочие ключи (сеансные ключи).

Долговременными ключами являются главные ключи, составляющие малую часть ключевого пространства, и периодическая смена именно этих ключей обеспечивает поддержание требуемого уровня защищенности передаваемой информации. Главные ключи распространяются центрами распределения ключей, обслуживающими несколько информационно-телекоммуникационных систем, и их число в каждом центре на определенном интервале времени может быть ограничено. В этих условиях при $T_{защ0}/T_{защ1} < 1$ смена главных ключей с учетом текущего уровня защищенности зашифрованной информации позволяет увеличить время использования каждого ключа при выполнении требования $P_{защ} \geq P_{защ. доп.}$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный методический подход к анализу стойкости симметричных криптографических алгоритмов ориентирован на использование при оценке текущего уровня защищенности информации в информационно-телекоммуникационных системах. В качестве основных

методов криптоанализа рассматриваются методы направленного перебора ключей шифрования. Исходными данными являются сведения о предполагаемой производительности вычислительных средств, имеющихся в распоряжении криптоаналитика, и об используемых им алгоритмах криптоанализа в части возможностей реализации направленного перебора. Результатом анализа является оценка среднего времени преодоления защиты, которая может быть использована для определения периода обновления долгосрочных ключей шифрования с учетом допустимой вероятности НСД к зашифрованной информации и текущего уровня ее защищенности при использовании анализируемого криптографического алгоритма.

Рассмотренный пример показывает важность использования оценки среднего времени преодоления защиты для текущего уровня защищенности информации при определении периода смены ключей шифрования. Если при календарном принципе смены ключей шифрования период их обновления не соответствует текущему уровню защищенности, то вероятность НСД к зашифрованной информации в течение части интервала времени между обновлениями будет превышать допустимый уровень.

Список используемых источников

1. *Малюк А. А.* Информационная безопасность: концептуальные и методологические основы защиты информации. – М.: Горячая линия–Телеком, 2004. – 280 с.
2. *Корниенко А. А., Еремеев М. А., Ададуров С. Е.* Средства защиты информации на железнодорожном транспорте: Криптографические методы и средства. – М.: Маршрут, 2006. – 256 с.
3. *Панасенко С. П.* Алгоритмы шифрования: спец. справочник. – СПб.: БХВ-Петербург, 2009. – 576 с.
4. *Столлингс В.* Криптография и защита сетей: принципы и практика: пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. – 698 с.
5. ГОСТ 34.12–2018. Информационная технология. Криптографическая защита информации. Блочные шифры. – М.: Стандартинформ, 2018. – 12 с.
6. *Гаценко О. Ю.* Защита информации. Основы организационного управления. – СПб.: Издательский дом «Сентябрь», 2001. – 228 с.
7. Криптография. Скоростные шифры / А. А. Молдовян [и др.]. – СПб.: БХВ-Петербург, 2002. – 493 с.
8. *Бабенко Л. К., Ицуква Е. А.* Современные алгоритмы блочного шифрования и методы их анализа. – М.: Гелиос АРВ, 2006. – 376 с.
9. *Зегжда П. Д., Ивашко А. М.* Основы безопасности информационных систем. – М.: Горячая линия–Телеком, 2000. – 452 с.
10. *Ростовцев А. Г., Маховенко Е. Б.* Теоретическая криптография. – СПб.: Профессионал, 2003. – 479 с.
11. *Шнайер Б.* Прикладная криптография. Протоколы, алгоритмы, исходные тексты на языке Си: пер. с англ. – М.: Триумф, 2002. – 816 с.
12. *Шахов В. Г., Елизарова Ю. М.* Анализ и расчет информационной безопасности. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. – 136 с.
13. Удостоверяющие автоматизированные информационные системы и средства. Введение в теорию и практику / С. В. Баушев [и др.]. – СПб.: БХВ-Петербург, 2016. – 304 с.
14. *Радько Н. М., Скобелев И. О.* Риск-модели информационно-телекоммуникационных систем при реализации угроз удаленного и непосредственного доступа. – М.: Радиософт, 2010. – 232 с.
15. *Васильева И. Н.* Криптографические методы защиты информации. – М.: изд-во «Юрайт», 2019. – 349 с.

16. *Бочаров Е. П., Колдина А. И.* Интегрированные корпоративные информационные системы. – М.: Финансы и статистика, 2005. – 288 с.
17. *Нельсон М., Чанг И.* Квантовые вычисления и квантовая информация: пер. с англ. – М.: Мир, 2006. – 824 с.
18. *Цилькер Б. Я., Орлов С. А.* Организация ЭВМ и систем. – СПб.: Питер, 2004. – 654 с.
19. *Рыбальченко М. В.* Организация ЭВМ и периферийные устройства. – Ростов-на-Дону: Южный федеральный ун-т, 2017. – 120 с.
20. *Владимиров В. И., Лихачев В. П., Шляхин В. М.* Антагонистический конфликт радиоэлектронных систем. Методы и математические модели. – М.: Радиотехника, 2004. – 384 с.
21. *Эндрюс Г. Р.* Основы многопоточного, параллельного и распределенного программирования: пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 512 с.
22. *Романец Ю. В., Тимофеев П. А., Шаньгин В. Ф.* Защита информации в компьютерных системах и сетях. – М.: Радио и связь, 2001. – 376 с.

А. А. Абдурахимов,
доктор технических наук, профессор;
В. В. Дуга,
кандидат технических наук
М. М. Полуян,
кандидат технических наук

РАСЧЕТ ПРЕДЕЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ДАВЛЕНИЯ ДВУХФАЗНОЙ СРЕДЫ В ГИДРАВЛИЧЕСКОМ КОНТУРЕ СИСТЕМЫ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПРИ ЕГО РАЗГЕРМЕТИЗАЦИИ

В связи с ростом количества техногенных объектов существенно повышается вероятность нарушения герметичности жидкостного контура системы терморегулирования космического аппарата. В представленной статье рассмотрены результаты моделирования двух случаев, описывающих предельные достижимые значения давления и температуры в магистралях системы терморегулирования типового космического аппарата. Результатом моделирования стал вывод о невозможности достижения в соединительных трубках результирующего давления насыщенных паров, способного нарушить герметичность магистралей системы терморегулирования и повлиять на работоспособность космического аппарата в целом.

Ключевые слова: космический аппарат, система терморегулирования, обеспечение теплового режима, система терморегулирования с жидкостным контуром.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наблюдается существенный рост космических объектов искусственного происхождения [3, 5–8, 11]. При этом существенно возрастает вероятность нарушения целостности герметичных элементов бортовых систем космического аппарата (КА) в целом и нарушения герметичности магистралей систем терморегулирования (СТР) в частности.

При нарушении герметичности жидкостного контура СТР на практике может проявляться эффект не только снижения температуры и давления в контуре, связанного с истечением теплоносителя в ОКП, но и локального повышения данных параметров в связи с неравномерным прогревом магистрали внешними тепловыми потоками, а также герметизацией выходного отверстия. Полученные предварительные оценки показывают, что перепад температур между зонами локального охлаждения и нагрева превышает 100°C. В результате возникает необходимость решить задачу получения оценок локальных значений температуры и давления теплоносителя, представляющего собой смесь пара и жидкости, внутри участков контура СТР, которые герметизированы со стороны локального повреждения остатками теплоносителя. Эти остатки охлаждаются до температуры замерзания, вследствие истечения теплоносителя в вакуум. Эффект герметизации становится более вероятным в условиях, включающих подвод внешних тепловых потоков, например благодаря затенению поврежденного участка контура элементами конструкции КА.

При этом следует рассматривать модельные ситуации для протяженного жидкостного контура СТР, который включает участки внутри герметичного отсека и вне его, входящие в состав радиатора и свободные участки трубопровода, покрытые экранно-вакуумной теплоизоляцией (ЭВТИ) и лишенные ее, т. е. имеющие оптические характеристики алюминиевого сплава без какого-либо оптического покрытия.

Выполненный анализ показал целесообразность рассмотрения двух моделей, характеризующих предельные достижимые значения давления и температуры для следующих участков:

- 1) участка трубопровода, непосредственно примыкающего к радиатору;
- 2) участка трубопровода, примыкающего к герметичному отсеку.

МОДЕЛЬ ТЕПЛООБМЕНА В ТРУБОПРОВОДЕ, ПРИМЫКАЮЩЕМ К РАДИАТОРУ

Давление парогазовой компоненты остатков теплоносителя определяется в первую очередь значением температуры. И для ее определения принята модель, представленная на рис. 1.

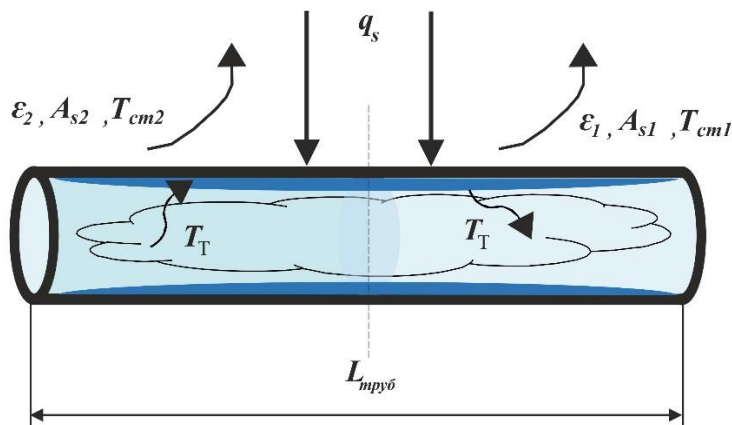


Рис. 1. Модель участка трубопровода, примыкающего к радиатору (модель № 1)

В рассматриваемой модели № 1 в качестве участка трубопровода принята полая трубка из алюминиевого сплава длиной $L_{\text{труб}}$ с внешним диаметром D и известной толщиной стенки (определяемой через внутренний диаметр d). Снаружи трубка подвергается воздействию прямого солнечного излучения с плотностью потока q_s . Внутри трубка заполнена паром теплоносителя в состоянии насыщения, который не покидает пределы рассматриваемого объема в силу его герметичности. При этом непосредственно по поверхности внутренних стенок трубки протекает конденсирующаяся из пара жидкость в результате установившейся в условиях микрогравитации разницы давлений между нагретой и холодной частями трубки.

Трубка условно разбита на две равные части, каждая из которых имеет различные оптические характеристики и условия внешнего теплообмена.

Все теплообменные процессы, происходящие снаружи и внутри частей трубки, приняты установившимися во времени, что позволяет записать нижеприведенные уравнения теплового баланса для каждой из них.

В модели № 1 приняты следующие допущения:

- для каждой части трубки температуры стенок и пара характеризуются равновесными значениями, одинаковыми для любой точки рассматриваемого объема;
- пренебрегается переотражением и переизлучением солнечного потока между трубкой и облицовочным слоем ЭВТИ, расположенной на некотором расстоянии от поверхности трубки;
- исключаются из рассуждений (в интересах упрощения модели) солнечный альбедо-поток и поток собственного излучения Земли;
- температуры внешней и внутренней стенок трубки считаются равными ввиду относительно малой толщины трубки из алюминиевого сплава и высокого значения коэффициента теплопроводности ($\lambda > 200$ Вт/мК);
- учитывается изменение температуры вследствие протекания по внутренней поверхности трубки пристеночного потока жидкости. При этом считается, что с поверхности жидкости

происходит непрерывный теплоотвод внутрь избыточного тепла, вследствие ее испарения (кипения). Температура жидкости принята равной температуре пара. Этой температуре пара соответствует некоторое давление насыщенных паров, постоянное во всем объеме трубки;

– не учитывается теплоотвод теплопроводностью по ребрам охлаждения (радиатора) от 2-го участка трубки, а также теплообмен теплопроводностью между участками трубки;

– теплообмен между частями трубки осуществляется только за счет массопереноса теплоносителя.

Правый участок. Он (с индексом 1, см. рис. 1) имеет оптические характеристики трубопровода, соответствующие алюминиевому сплаву без какого-либо оптического покрытия, т. е. с невысокими значениями $A_{s1} \leq 0,15$ и еще более низкими значениями $\varepsilon_1 \leq 0,1$. Таким образом, поток собственного теплового излучения правого участка трубки уходит со всей его поверхности фактически безвозвратно, а уравнение теплового баланса для стенки 1-го участка трубки имеет вид

$$A_{s1} \cdot q_s \cdot D \cdot L_1 - \varepsilon_1 \cdot \sigma \cdot T_{CT1}^4 \cdot \pi \cdot D \cdot L_2 = \alpha (T_{CT1} - T_T) \cdot \pi \cdot d \cdot L_1, \quad (1)$$

где $\alpha = 2,7 \div 3,5$ Вт/м²К – коэффициент теплоотдачи, зависящий от текущего перепада температур между участками трубки и определяемый для свободного движения жидкости в условиях микрогравитации (10^{-5} м/с²) по зависимости

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_p}{d},$$

где Nu – число Нуссельта, определяемое по отдельной методике [9] в диапазоне перепадов температур 10–150°С;

λ_p – коэффициент теплопроводности пара теплоносителя, Вт/мК

Вместе с тем в принятой модели теплообмена тепловой поток, отведенный жидкостью от стенки, будет полностью расходоваться на парообразование при той же температуре:

$$\alpha (T_{CT1} - T_T) \cdot \pi \cdot d \cdot L_1 = L_{уд} \cdot m_T, \quad (2)$$

где $L_{уд}$ – удельная теплота парообразования теплоносителя, Дж/кг;

m_T – масса испаряющегося в единицу времени теплоносителя, кг/с.

Необходимо отметить, что в установившемся режиме температура теплоносителя T_T в обоих концах трубки будет одинакова.

Левый участок. На левом участке (с индексом 2, см. рис. 1) будет происходить процесс конденсации пара при этой же температуре (температуре теплоносителя T_T на правом участке), что обеспечит теплоподвод к стенке 2-го участка:

$$\alpha (T_T - T_{CT2}) \cdot \pi \cdot d \cdot L_2 = L_{уд} \cdot m_T. \quad (3)$$

Вместе с тем собственное тепловое излучение 2-го участка трубы в сторону корпуса КА, покрытого ЭВТИ, фактически возвращается обратно вследствие протяженных размеров радиатора, примыкающего к участку трубы. Поэтому теплоотвод собственного излучения возможен только в направлении от радиатора в ОКП, и уравнение теплового баланса для стенки 2-го участка трубы имеет вид

$$A_{s2} \cdot q_s \cdot D \cdot L_2 - \varepsilon_2 \cdot \sigma \cdot T_{CT2}^4 \cdot \frac{\pi \cdot D \cdot L_2}{2} = \alpha (T_T - T_{CT2}) \cdot \pi \cdot d \cdot L_2. \quad (4)$$

Решение системы уравнений (1)–(4) позволяет найти переменные $T_{ст1}$, $T_{ст2}$, T_T , m_T . Найденному значению температуры теплоносителя будет соответствовать конкретное значение давления его насыщенных паров p_T .

МОДЕЛЬ ТЕПЛООБМЕНА В ТРУБОПРОВОДЕ, ПРИМЫКАЮЩЕМ К ГЕРМЕТИЧНОМУ ОТСЕКУ

Рассмотрим еще одну модель, согласно которой значительная часть пара расположена в части жидкостного контура СТР, находящегося внутри герметичного отсека КА. Там же располагается зона конденсации теплоносителя. Модель № 2 представлена на рис. 2.

В качестве модели № 2 участка трубопровода принята полая трубка с геометрическими характеристиками, соответствующими модели № 1. Внутри она также заполнена паром теплоносителя в состоянии насыщения, который не покидает пределы рассматриваемого объема. При этом непосредственно на поверхности внутренних стенок трубки протекает конденсирующаяся из пара жидкость в результате установившейся в условиях микрогравитации разницы давлений между нагретой и холодной частями трубки.

Правый участок. Трубка условно разбита на две равные части. Правый участок (с индексом 1, рис. 2) имеет оптические характеристики и условия внешнего теплообмена, полностью соответствующие правому участку из модели № 1.

Левый участок. Левый участок трубопровода (с индексом 2, рис. 2) с оптическими характеристиками алюминиевого сплава, без какого-либо оптического покрытия, располагается внутри герметичного объема с газовой атмосферой. Наличие окружающих объектов в отсеке моделируется изотермическим цилиндрическим «кожухом», расположенным на удалении $0,5 \cdot \Delta D \geq 3D$ от трубки с теплоносителем. То есть его диаметр равен $D + \Delta D$, а степень черноты на внутренней поверхности $\varepsilon_1 \approx 0,1$. Температура «кожуха» соответствует температуре приборов: $T_{пр} = 50^\circ\text{C}$. Передача теплового потока между участком трубки и кожухом осуществляется преимущественно излучением.

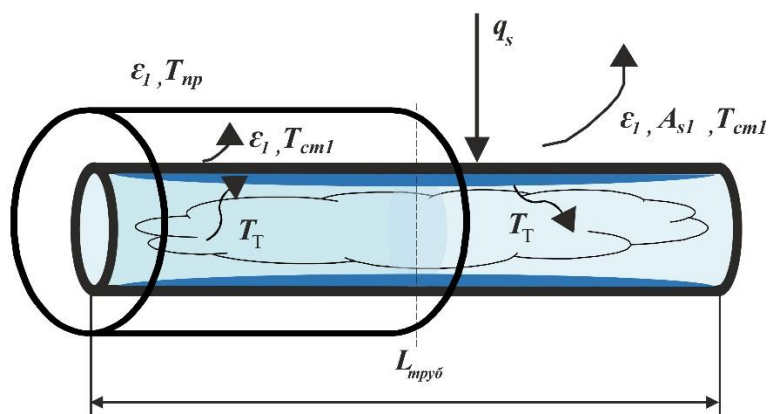


Рис. 2. Модель участка трубопровода, примыкающего к приборному отсеку (модель № 2)

Таким образом, в модели №2 используются следующие допущения:

- пренебрегается переотражением и переизлучением солнечного потока между трубкой и облицовочным слоем ЭВТИ, расположенной на некотором расстоянии от поверхности трубки;
- исключаются из рассуждений (в интересах упрощения модели) солнечный альбедо-поток и поток собственного излучения Земли;

– температура внешней и внутренней стенок трубки считаются равными ввиду относительно малой толщины трубки из алюминиевого сплава и высокого значения коэффициента теплопроводности;

– учитывается изменение температуры вследствие протекания по внутренней поверхности трубки пристеночного потока жидкости. При этом считается, что с поверхности жидкости происходит непрерывный теплоотвод внутрь избыточного тепла, вследствие ее испарения (кипения). Температура жидкости принята равной температуре пара. *Этой температуре пара соответствует некоторое давление насыщенных паров, постоянное во всем объеме трубки;*

– теплообмен между частями трубки осуществляется только за счет массопереноса теплоносителя;

– температура «кожуха» считается постоянной.

Уравнения теплового баланса для правого участка № 1 соответствуют ранее приведенным для модели № 1 уравнениям (1) и (2):

$$A_{s1} \cdot q_s \cdot D \cdot L_1 - \varepsilon_1 \cdot \sigma \cdot T_{ст1}^4 \cdot \pi \cdot D \cdot L_1 = \alpha (T_{ст1} - T_T) \cdot \pi \cdot d \cdot L_1 \quad (5)$$

и

$$\alpha (T_{ст1} - T_T) \cdot \pi \cdot d \cdot L_2 = L_{уд} \cdot m_T \quad (6)$$

В установившемся режиме температура теплоносителя T_T в обоих концах трубки будет одинакова. Однако на левом участке № 2 будет происходить процесс конденсации пара при этой же температуре, что обеспечит теплоприток к стенке 2-го участка.

Теплообмен трубопровода с «кожухом» описывается, с учетом допущений, следующей зависимостью:

$$\varepsilon_{пр} \cdot \sigma \cdot (T_{ст2}^4 - T_{пр2}^4) \cdot \pi \cdot D \cdot L_2 = \alpha (T_T - T_{ст2}) \cdot \pi \cdot d \cdot L_2, \quad (7)$$

где $\varepsilon_{пр}$ – приведенная степень черноты, которая определяется формулой

$$\varepsilon_{пр} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{D}{(D + \Delta D)} \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right)}$$

Решение системы уравнений (5)–(7) позволяет найти переменные $T_{ст1}$, $T_{ст2}$, T_T , m_T . Найденному значению температуры теплоносителя будет соответствовать конкретное значение давления его насыщенных паров p_T .

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для модели № 1.

Безусловно, получение точных значения T_T требует точных значений используемых характеристик и может потребовать также уточнения представленной модели, однако расчеты показывают удовлетворительное согласие результатов численного решения уравнений (1)–(4) в частном случае с отсутствием внутреннего теплообмена, когда равновесные температуры участков установятся около $T_{ст1} \approx 150^\circ\text{C}$ и $T_{ст2} \approx -60^\circ\text{C}$ [10].

Решение системы уравнений (1)–(4) для рассмотренной модели № 1 теплообмена показывает, что за счет большого значения скрытой теплоты парообразования (конденсирования) $L_{уд} \geq 0,5 \cdot 10^6$ Дж/кг происходит значительное изменение температур стенок и теплоносителя. При этом наблюдается характерная особенность в значении температуры теплоносителя, вытекающая из уравнений (2) и (3):

$$(T_T - T_{ст2}) \cdot L_2 = (T_{ст1} - T_{ст2}) \cdot L_2 = (T_{ст1} - T_T) \cdot L_1$$

или

$$T_T = T_{ст1} \cdot \frac{L_1}{L} + T_{ст2} \cdot \frac{L_2}{L} \quad (8)$$

где $L = L_1 + L_2$ – длина всего трубопровода. То есть температура теплоносителя в установившемся режиме принимает значение в интервале температур стенок участков (нагретого и холодного), пропорциональное длине рассматриваемых участков. Например, вышеуказанным исходным данным при $L_1 = L_2$ соответствуют значения $T_{ст1} = 70^\circ\text{C}$, $T_{ст2} = 5^\circ\text{C}$, $T_T = 40^\circ\text{C}$. При этом для участия в процессе парообразования достаточно менее 5 мкг/сек теплоносителя.

Также для системы (1)–(4) множеству решений принадлежит сочетание значений параметров $T_{ст1} = 125^\circ\text{C}$, $T_{ст2} = 45^\circ\text{C}$, $T_T = 115^\circ\text{C}$, которое может достигаться при соотношении длин участков $6 \cdot L_2 = L_1$ (большая часть трубопровода расположена *вне радиатора*). Указанному пороговому значению температуры теплоносителя соответствует давление насыщенных паров для используемых в настоящее время марок теплоносителей [2]. Однако, учитывая фактическую протяженность контура СТР и объем всех трубок (даже только без теплоизоляции), на практике указанное выше соотношение объемов не сложится. Таким образом, фактическое значение локального давления в ситуации, соответствующей модели № 1, никогда не превысит давления насыщенных паров применяемого теплоносителя, соответствующего установившейся температуре.

Для модели №2.

Решению системы уравнений (5)–(7) для рассмотренной модели № 2 теплообмена, например, для указанных выше исходных данных при $L_2 = L_1$, соответствуют значения $T_{ст1} = 125^\circ\text{C}$, $T_{ст2} = 95^\circ\text{C}$, $T_T = 110^\circ\text{C}$ при участии в процессе парообразования менее 2 мкг/сек теплоносителя. Очевидно, что для модели № 2 в результате совместного решения уравнений (6) и (7) получим уравнение вида (8), согласно которому установившаяся температура теплоносителя T_T пропорциональна длине участков трубки, расположенных внутри герметичного отсека и вне его. Причем в рассматриваемой модели № 2 уже при равенстве длин участков L_1 и L_2 достигается температура теплоносителя, соответствующая давлению насыщенных паров. Однако принципы устройства СТР КА предполагают, что большая часть объема теплоносителя всегда находится в герметичном отсеке с целью непосредственного охлаждения размещенных там приборов и агрегатов. Таким образом, $L_2 \gg L_1$, что в установившемся режиме в результате нагрева теплоносителя на Солнце гарантирует значение давления в соединительных трубках жидкостного контура ниже давления насыщенных паров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования с использованием разработанных моделей позволяют повысить точность определения фактического состояния КА и математически описать происходящие на борту процессы, что необходимо даже при наличии телеметрической информации для прогнозирования технического состояния КА и своевременного принятия мер во избежание его перехода в неработоспособное состояние.

Разработанные модели реализованы в *MathLab*. Результаты моделирования термодинамических процессов в жидкостном контуре СТР КА в условиях нарушения его герметичности, выполненного с допущениями, которые влияют только на изменение температур и давления теплоносителя, доказывают невозможность достижения в соединительных трубках результирующего давления насыщенных паров.

Список используемых источников

1. *Абдурахимов А. А., Авксентьев А. А., Сасункевич А. А.* Методика расчета координат места утечки теплоносителя из системы терморегулирования космического аппарата // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – Вып. 673. – 2020. – С. 136–144.
2. Проектирование системы обеспечения теплового режима модуля аккумуляторных батарей наноспутника формата CUBESAT / Е. А. Болтов [и др.] // Космические аппараты и технологии. – 2022. – №1(39), т. 6. – С. 29–37.
3. *Краус Е. И., Шабалин И. И.* Воздействие высокоскоростных частиц техногенного космического мусора на сложные технические объекты и их элементы // Космические аппараты и технологии. – 2016. – № 3-4(18). – С. 6–11.
4. *Кухтин А. В., Денисов А. М., Девяткина Т. Ю.* Практические рекомендации по разработке системы обеспечения теплового режима космического аппарата // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2018. – Вып. 11. – С. 113–123.
5. *Клюшников В. Ю.* Как очистить околоземное пространство от космического мусора? // Воздушно-космическая сфера. – 2019. – №1(98). – С. 96–107.
6. *Новиков Л. С.* Воздействие твердых частиц естественного и искусственного происхождения на космические аппараты: учеб. пособие. – М.: Университетская книга, 2009. – 104 с.
7. *Садонин Н. Е., Сушкевич Н. В.* Космический мусор и его влияние на работоспособность космических аппаратов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2014. – С. 376–377.
8. *Сёмкин Н. Д., Телегин А. М., Видманов А. С.* Малый космический аппарат для регистрации микрометеороидов и частиц космического мусора // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С. П. Королёва (национального исследовательского университета). – 2016. – Т. 15, № 1. – С. 115–121.
9. Термодинамика и теплопередача: учебник / А.В. Хорошавин [и др.]; под ред. М. М. Пенькова. – СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2012. – 448 с.
10. *Фаворский О. Н., Каданер Я. С.* Вопросы теплообмена в космосе. – М.: Высш. шк., 1967. – 248 с.
11. *Шабалин И. И.* Инженерная модель оценки параметров облака осколков за тонким экраном // Численные методы решения задач теории упругости и пластичности: тр. XVII Межресп. конф. Новосибирск, 3–5 июля 2001 г. – Новосибирск, 2001. – С. 251–256.

С. В. Агишев;
Е. Л. Лебедев,
доктор технических наук, профессор

МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Проанализированы процессы функционирования подсистемы подготовки космического аппарата (технологическую операцию), так как оценивание эффективности подготовки КА в целом (с учетом самых разнообразных факторов) можно осуществить, имея модели оценивания отдельных технологических операций.

Ключевые слова: средство измерений, стохастическая сеть, ошибки первого и второго рода.

ВВЕДЕНИЕ

Измерительный контроль состояния космического аппарата (КА) осуществляется путем измерения основных параметров систем КА с помощью средств измерений, установленных в технологическом оборудовании. Если контролируемые параметры находятся в поле допусков, указанных в эксплуатационной документации, то принимается решение о работоспособном состоянии систем КА. В противном случае осуществляется восстановление систем КА путем замены отказавшего средства измерений.

Из-за случайного разброса значений контролируемых параметров и погрешностей измерений при принятии решений о состоянии КА возникают ошибки первого и второго рода. Ошибки первого рода приводят к непроизводительным затратам времени на восстановление работоспособной системы КА, а ошибки второго рода – к пропуску отказов у КА. В большинстве случаев для поиска отказавшего средства измерения в признанной по результатам контроля неработоспособной системе КА проводится техническое диагностирование системы КА, которое осуществляется с помощью измерения диагностируемых параметров. При этом в процессе принятия решений также возникают ошибки первого и второго рода.

МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Используя ориентированный граф, представленный на рис. 1, можно вычислить показатель $P'_{ВЗ}$ и параметры условного закона распределения времени выполнения технологических операций (ТхОп) в зависимости от показателей безотказности сложных систем и технологического оборудования, от параметров организации ТхОп и показателей достоверности контроля технического состояния и технического диагностирования следующим образом.

Так как сложные системы (СС) и технологическое оборудование (ТхОб) в процессе проведения ТхОп могут переходить из одних состояний в другие с соответствующими вероятностями переходов, то процесс проведения ТхОп может быть представлен в виде ориентированного графа (рис. 1). В итоге можно выделить 17 различных состояний: 0 – подготовка ТхОб к проведению контроля технического состояния (КТС) СС; 1 – ТхОб готово к проведению КТС СС; 2 – КТС работоспособной СС, 3 – КТС неработоспособной СС; 4 – диагностирование работоспособной СС; 5 – диагностирование неработоспособной СС; 6 – восстанов-

ление работоспособной СС; 7 – восстановление неработоспособной СС; 8 – восстановление работоспособного прибора неработоспособной СС; 9 – диагностирование неработоспособного ТхОб; 10 – восстановление отказавшего блока ТхОб; 11 – восстановление работоспособного блока отказавшего ТхОб; 12 – КТС работоспособного ТхОб; 13 – КТС неработоспособного ТхОб; 14 – диагностирование работоспособного ТхОб; 15 – восстановление работоспособного блока ТхОб; 16 – работоспособное состояние СС после проведения ТхОб; 17 – неработоспособное состояние СС после проведения ТхОб.

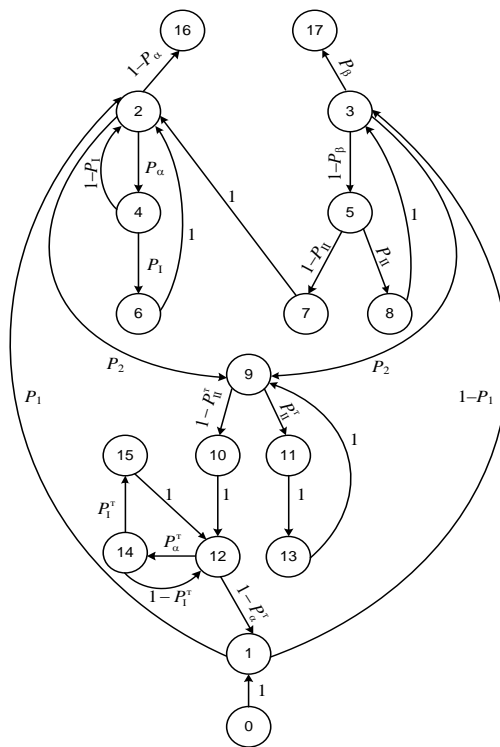


Рис. 1. Ориентированный граф

Как видно из рис. 1, стохастическая сеть представляет собой возможные варианты изменения состояний СС и ТхОб во время проведения ТхОб, начиная с момента проведения ТхОб (состояние 0) до момента окончания ТхОб (состояния 16 и 17). В данной сети дуги характеризуют не только вероятности переходов из одного состояния в другое, но и случайную продолжительность переходов.

А если использовать данную стохастическую сеть (рис. 2), то можно вычислить показатель $P'_{ВЗ}$ и параметры условного закона распределения времени выполнения технологических операций (ТхОб) в зависимости от показателей безотказности сложных систем и технологического оборудования, параметров организации ТхОб и показателей достоверности контроля технического состояния и технического диагностирования следующим образом.

В первую очередь вычисляются, согласно [8], вероятности $P(\hat{H}_i)$, где \hat{H}_i – гипотеза, заключающаяся в реализации дуги a_i .

Так как

$$\sum_{i=1}^{38} P(\hat{H}_i) = 1, \tag{1}$$

то погрешность ϵ метода моделирования определится как

$$\varepsilon = 1 - \sum_{i=1}^{38} P(\hat{H}_i). \quad (2)$$

Показатель результативности ТхОп $P'_{ВЗ}$ вычисляется по формуле

$$P'_{ВЗ} = P(\hat{\mathcal{G}} \geq \mathcal{G}^{тп}) = \sum_{i=1}^{38} P(\hat{H}_i) = 1. \quad (3)$$

Для вычисления показателя $P''_{ВЗ}$ необходимо определить $\hat{\phi}_i | \hat{\mathcal{G}}$ – условную плотность распределения операционного времени выполнения ТхОп.

Достаточно универсальной вероятностной моделью операционного времени является четырехпараметрическое бета-распределение, плотность которого имеет следующий вид:

$$\hat{\phi}_i | \hat{\mathcal{G}}(t) = \hat{\phi}_i | \hat{\mathcal{G}}(t, t_{\min}, t_{\max}, \alpha, \beta) = \frac{(t - t_{\min})^{\alpha-1} (t_{\max} - t)^{\beta-1}}{B(\alpha, \beta) (t_{\max} - t_{\min})^{\alpha+\beta-1}}, \quad (4)$$

где $t_{\min}, t_{\max}, \alpha, \beta$ – параметры распределения;

$B(\alpha, \beta)$ – бета-функция (интеграл Эйлера I рода), которая вычисляется через гамма-функцию (интеграл Эйлера II рода) по формулам:

$$B(\alpha, \beta) = \frac{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)}{\Gamma(\alpha + \beta)}; \quad (5)$$

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} t^{\alpha-1} l^{-t} dt. \quad (6)$$

Для вычисления α и β можно воспользоваться следующими формулами:

$$\alpha = (M[\hat{t}] - t_{\min}) / \sqrt{D[\hat{t}]}; \quad (7)$$

$$\beta = 6 - \alpha, \quad (8)$$

где $M[\hat{t}]$ и $D[\hat{t}]$ представляют собой математическое ожидание и дисперсию операционного времени выполнения ТхОп.

Для вычисления показателя $P''_{ВЗ}$ необходимо определить $\hat{\phi}_i | \hat{\mathcal{G}}$ – условную плотность распределения операционного времени выполнения ТхОп.

Используя стохастическую сеть (рис. 2), числовые характеристики операционного времени выполнения ТхОп можно определить следующим образом:

$$\begin{aligned} M[\hat{t}] &= \sum_{i=1}^{38} P(\hat{H}_i) M[\hat{t} / H_i], \\ D[\hat{t}] &= v_2[\hat{t}] - (M[\hat{t}])^2, \\ v_2[\hat{t}] &= \sum_{i=1}^{38} P(\hat{H}_i) v_2[\hat{t} / H_i], \end{aligned} \quad ; \quad (9)$$

$$v_2[\hat{t} / H_i] = D[\hat{t} / H_i] + (M[\hat{t} / H_i])^2.$$

где $M[\hat{t} / H_i]$ – условное математическое ожидание операционного времени выполнения ТхОп (при условии, что имела место гипотеза H_i);

$D[\hat{t} / H_i]$ – условная дисперсия операционного времени выполнения ТхОп (при условии, что имела место гипотеза H_i);

$v_2[\hat{t} / H_i]$ – условный второй начальный момент операционного времени выполнения ТхОп (при условии, что имела место гипотеза H_i).

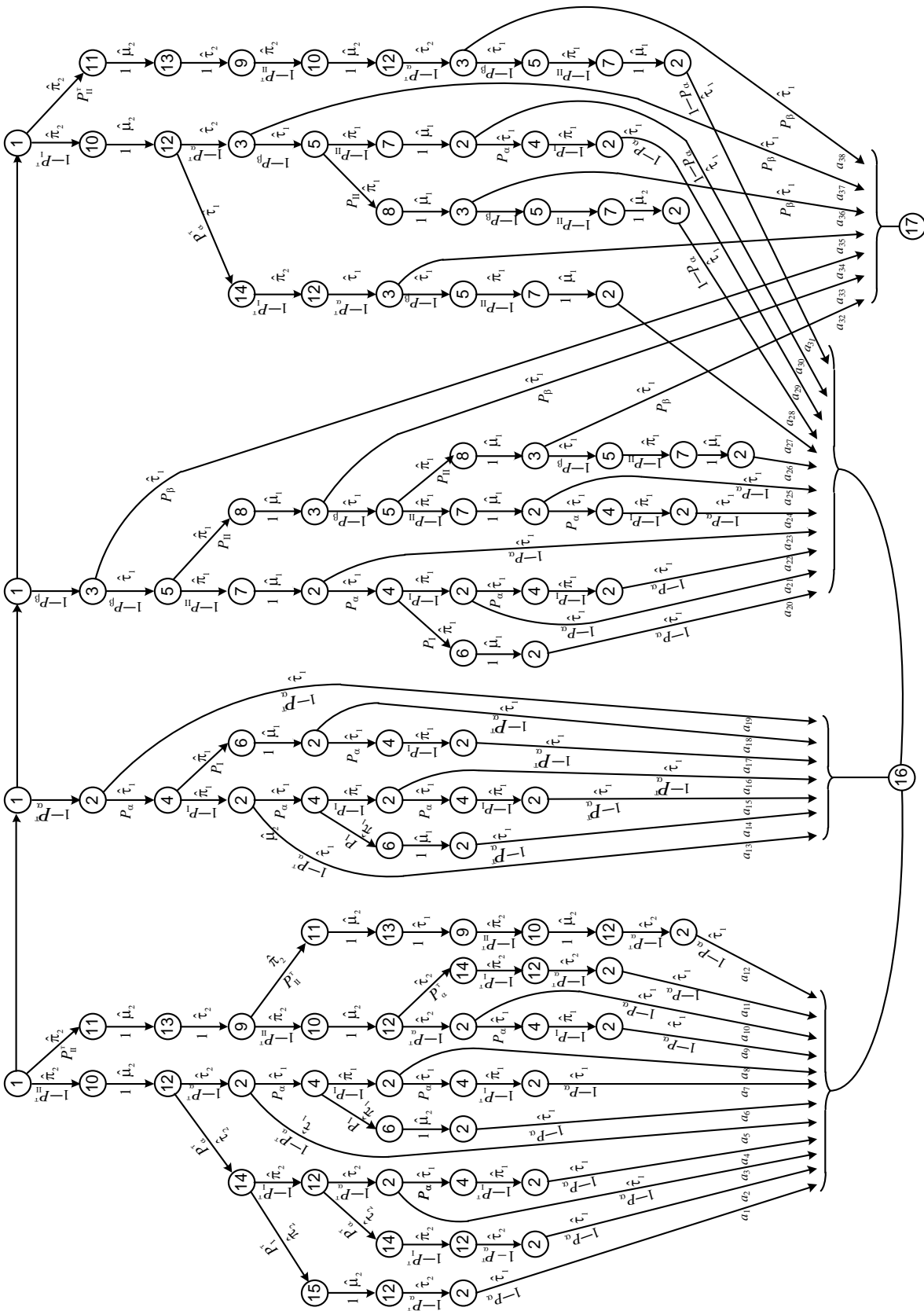


Рис. 2. Стохастическая сеть сложных систем

Таким образом, полученные соотношения позволяют установить зависимости показателей результативности и оперативности ТхОп от показателей безотказности КА, ТхОб и СИ, параметров организации ТхОп и показателей достоверности контроля технического состояния и технического диагностирования КА, ТхОб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенного анализа проблемы повышения эффективности подготовки КА к применению раскрыт механизм влияния качества метрологического обеспечения на эффективность подготовки КА, и установлено, что недостаточно изучены к настоящему времени вопросы влияния зависимости показателей результативности и оперативности ТхОп от показателей безотказности КА, участвующих в измерительном контроле КА, и от параметров системы метрологического обеспечения СИ на эффективность подготовки КА к применению.

Показано, что исследования в выбранном направлении позволяют внести вклад в решение следующих практических задач:

- повышения оперативности подготовки КА к применению в особые периоды военно-политической обстановки;
- повышения качества и оперативности проведения метрологической экспертизы на всех этапах «жизненного» цикла КА.

Список используемых источников

1. *Абраменко В. С., Маслов А. Я., Немудрук Л. Н.* Эксплуатация автоматизированных систем управления. – [б. м.]: Изд-во МО СССР, 1984. – 485 с.
2. Автоматическая аппаратура контроля радиоэлектронного оборудования / Н. Н. Пономарев [и др.]; под ред. Н. Н. Пономарева. – М.: Сов. радио, 1975. – 327 с.
3. *Ахьюджа Х.* Сетевые методы управления в проектировании и производстве: пер. с англ. – М.: Мир, 1979. – 486 с.
4. *Беляев Б. М., Новагов В. В., Фряцман Ю. Э.* Порядок назначения и корректировки межповерочных интервалов средств измерений // Метрология. – 1991. – № 9. – С. 46–52.
5. *Беляев Б. М., Новиков В. В.* Влияние вида отказа на величину межповерочных интервалов // Метрологическое обеспечение разработки, производства и эксплуатации средств измерений. – М., 1989. – С. 85–102.
6. *Бронштейн И. Н., Семендяев К. А.* Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. – 13-е изд., исправл. – М.: Наука, 1986. – 544 с.
7. *Вентцель Е. С.* Исследование операций: задачи, принципы, методология. – 2-е изд., стер. – М.: Наука, 1988. – 208 с.
8. *Вентцель Е. С., Овчаров Л. А.* Теория вероятностей и ее инженерные приложения. – М.: Наука, 1988. – 480 с.

А. В. Антропова;
В. В. Козлов,
доктор технических наук, профессор;
С. Ф. Стельмах,
кандидат военных наук

МОДЕЛИ СТРУКТУР КОМПОНЕНТОВ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ СИСТЕМ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Представлены основные положения математической модели структур электромеханических приводов обеспечивающих систем малых космических аппаратов. Такая модель позволяет описать возможные появление и развитие нештатных ситуаций с целью обоснования принимаемых решений по управлению находящихся в нештатных состояниях электромеханических приводов обеспечивающих систем малых космических аппаратов.

Ключевые слова: электромеханический привод, малый космический аппарат, моделирование, нештатная ситуация, структура, операция.

ВВЕДЕНИЕ

Ограниченность возможностей экспериментального исследования электромеханических приводов (ЭМП) обеспечивающих систем (ОС) малых космических аппаратов (МКА) делает актуальной разработку методики анализа технического состояния приводов в условиях деградации электромеханического оборудования. Имитационное моделирование, выполняемое на математических моделях, позволяет достаточно полно представить практически все эксплуатационные процессы ЭМП ОС МКА. Исходя из этого целью моделирования функционирования ЭМП ОС МКА является описание возможного появления и развития нештатных ситуаций для обоснования принимаемых решений по управлению ЭМП, находящихся в состояниях развития деградационных процессов.

Методологическая общность таких исследований позволяет получать необходимую информацию практически для всех ЭМП ОС МКА, находящихся в летной эксплуатации. Имитационное моделирование ЭМП ОС МКА, как и их проектирование, – процесс многоаспектный и многоуровневый. Для таких объектов характерно наличие нескольких уровней иерархии. Уровни иерархии определяют число объектов моделирования. Множество объектов моделирования представляется как сумма множеств элементов декомпозиции всех уровней и исходного объекта декомпозиции. Каждому элементу этого множества соответствует множество моделей, отражающих различные аспекты описания взаимосвязей соответствующих моделей. Множество моделей каждого элемента объекта зависит от цели моделирования и формируется в процессе декомпозиции этих моделей.

АКТУАЛЬНОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ СИСТЕМ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Целью моделирования функционирования ЭМП ОС МКА является описание появления и развития возможных нештатных ситуаций, связанных с развитием деградационных процессов для обоснования принимаемых решений по управлению ЭМП ОС МКА, находящимися в

состояниях реальной эксплуатации. Математическое описание функционирования ЭМП ОС МКА и их компонентов (рис. 1) в состоянии реальной эксплуатации включает описание функций элементов как формальных объектов, имеющих конечное число полюсов, конечное множество различных состояний и выполняющих конечное множество преобразований свойств передаваемых и преобразуемых потоков энергии и информации, формализуемых в виде числовых кодов, которые отражают преобразование свойств потоков. Такое описание включает разработку следующих математических объектов:

- модели функционирования элементов в виде деревьев функционирования, отражающих функционирование элементов в штатных и нештатных режимах работы;
- модели структуры в виде динамических графов (гиперграфов), отображаемых диаграммами, матрицами, числовыми кодами;
- модели операций в виде путей (циклов) в графе структуры, представляемых диаграммами, структурно-логическими формулами, матрицами и кодами;
- модели функционирования в виде деревьев функционирования, где ствол дерева описывает штатное функционирование в соответствии с заданным алгоритмом функционирования, а ответвления в каждом i -м такте функционирования – переходы в состояния реальной эксплуатации, происходящие в результате проявления развивающихся деградиционных явлений при срабатывании функциональных элементов.

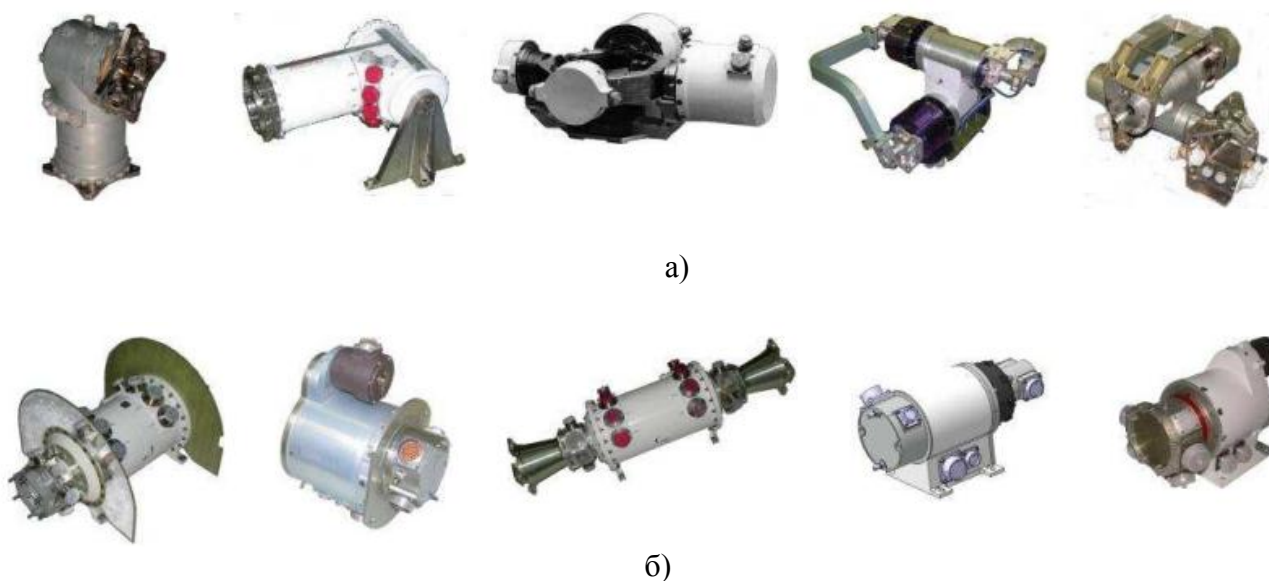


Рис. 1. Электромеханические приводы обеспечивающих систем малых космических аппаратов:

- а – электромеханические приводы системы наведения антенн;
б – электромеханические приводы систем ориентации солнечных батарей*

В зависимости от цели исследования и формулировок задач исследования формируются специфические модели, и всегда есть возможность расширить их множество. Вряд ли существует какой-либо принцип объективного строго математического оценивания полноты комплекса моделей исследуемых объектов. Вместе с тем желательно сформулировать принципы формирования комплекса моделей, необходимого и достаточного для анализа функционирования ЭМП ОС МКА в состояниях развивающихся деградиционных процессов, с целью формирования необходимой и достаточной информации для принятия обоснованных решений на управление объектами в этих состояниях.

МОДЕЛИ СТРУКТУР КОМПОНЕНТОВ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ СИСТЕМ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Под моделями структуры исследуемого объекта понимаются модели, отображающие состав и связи элементов. Два элемента называются связанными, если они имеют возможность обмениваться энергией и информацией непосредственно через их полюса [1].

При изложении методологических аспектов [2] показано, что ЭМП ОС МКА целесообразно описывать многоуровневыми иерархическими моделями. Деление сложного объекта на элементы зависит от специфики задачи, требуемого уровня детализации. В общем случае для всех элементов рассматриваемых ОС могут иметь место, независимо от уровня детализации, следующие виды связи:

- функциональные;
- конструктивные;
- компоновочные.

Функциональные связи характеризуются тем, что для выполнения функций элементы компонентов ОС обмениваются потоками энергии. Конструктивные связи предполагают физический контакт и силовое нагружение элементов. Компоновочные связи отражают взаимное расположение элементов, которое определяет возможность доступа к одному из элементов. При проведении структурно-функциональных исследований необходимо определить вид связей.

Согласно целям исследования и учитывая приоритетный принцип разбиения по функциям управляющей системы, далее рассматриваются функциональные связи. Модели структур компонентов ОС, с одной стороны, должны носить общий характер, с другой – должны учитывать особенности, обусловленные конструктивными и функциональными свойствами компонентов ОС, а также физической природой циркулирующих в них потоков энергии. Этому условию в достаточной мере отвечают модели, представленные в виде графов.

Модель структуры компонентов ЭМП ОС МКА описывает связи элементов соответствующего уровня декомпозиции и отображается графом $G_k(V_k, X_k)$, где $V_k = \{v_1, v_2, \dots, v_i, \dots, v_{i^*}\}$ – множество вершин, которым соответствуют элементы компонентов ЭМП ОС МКА (i^* – число элементов рассматриваемого компонента); $X_k = \{x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_{j^*}\}$ – множество ребер, которым соответствуют связи между элементами, реализуемые путем совмещения полюсов (входных и выходных) элементов (j^* – число связей между элементами рассматриваемого компонента).

Особенности компонентов ОС МКА обусловлены физической природой циркулирующих в них потоков энергии и их конструктивными функциональными свойствами. При описании структур компонентов ОС МКА моделями в виде графов в общем случае они учитываются с помощью:

- разделения множества элементов $V_{\{i^*\}}$ в каждом компоненте ОС на подмножества терминальных (конечных) V^T и промежуточных $V^{ПР}$ функциональных элементов;
- учета направления циркулирующих потоков энергии. Возникает невозможность замены неориентированных ребер парами противоположно направленных дуг, что справедливо и для простых преобразований абстрактных графов;
- учета управления, воздействия внешних факторов и отказов элементов.

В качестве исходных данных для построения моделей структуры компонентов ОС необходимы модели элементов и принципиальная схема компонентов, отражающая связи между элементами. Графы $G_k(V_k, X_k)$ как математические модели могут иметь различные формы

своего отображения: диаграммы и матрицы $A_{[i,*]}$ смежности и $B_{[i^*,j^]}$ инцидентности [3], списочные представления [4], числовые коды [5, 6].

Матрицей смежности $A_{[i,*]}$ графа $G_k(V_k, X_k)$ называется матрица, элементы которой принимают значения:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{— если вершина } v_i \text{ связана с вершиной } v_j, \\ 0 & \text{— в противном случае.} \end{cases}$$

В качестве примера на рис. 2 представлена принципиальная схема кинематической цепи редуктора ЭМП.

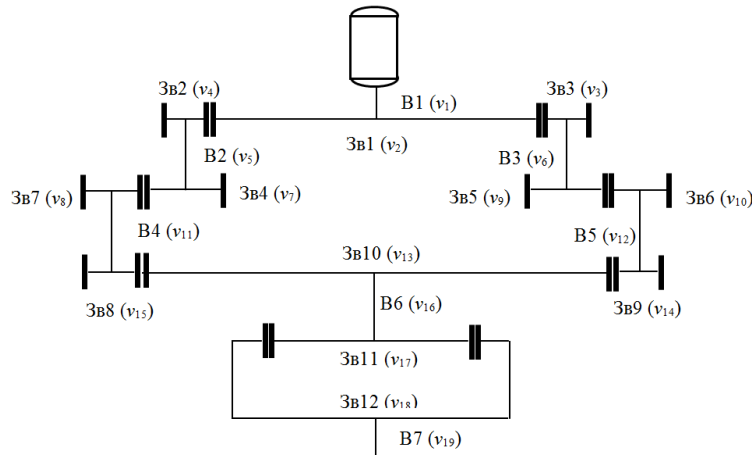


Рис. 2. Схема кинематической цепи редуктора ЭМП, где Зв – звено, В – вал

Модель структуры указанной кинематической цепи представлена в виде диаграммы графа $G_k(V_k, X_k)$ структуры, показанной на рис. 3.

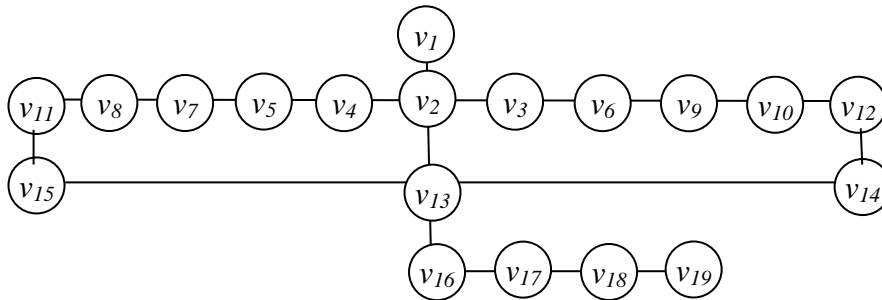


Рис. 3. Диаграмма графа $G_k(V_k, X_k)$ структуры

На рис. 4 показана матрица $A_{[i,*]}$ смежности, являющаяся моделью структуры фрагмента кинематической цепи редуктора ЭМП, принципиальная схема которой представлена на рис. 2.

В результате выполнения правил равносильных преобразований формируются диаграмма упрощенного графа структуры и окончательная упрощенная матрица графа структуры, называемая, в отличие от матрицы смежности, матрицей связей. Для рассматриваемого в качестве примера фрагмента кинематической цепи (см. рис. 2) соответствующие упрощенные граф и матрица представлены на рис. 5 и 6.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	$\sigma(v_i)$	
1		1																			1
2	1		1	1																	3
3		1				1															2
4		1			1																2
5				1			1														2
6			1						1												2
7					1			1													2
8							1				1										2
9						1				1											2
10									1			1									2
11								1							1						2
12										1				1							2
13													1	1	1						3
14										1	1										2
15											1		1								2
16												1					1				2
17																1		1			2
18																		1		1	2
19																			1		1

Рис. 4. Модель структуры кинематической цепи – матрица смежности $A_{[19]}$ графа структуры, где $\sigma(v_i)$ – число связей

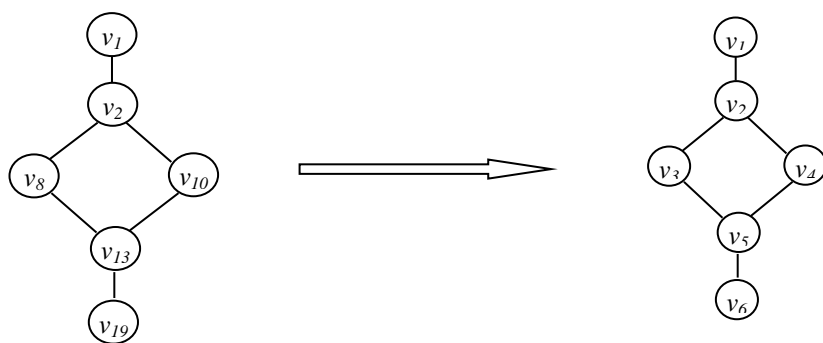


Рис. 5. Модель структуры кинематической цепи – диаграмма упрощенного графа структуры $G_k(V_k, X_k)$.

				8	10	13	19	
		1	2	3	4	5	6	$\sigma(v_i)$
	1		K_1					1
	2	K_2		K_3	K_4			3
8	3		K_5			K_6		2
10	4		K_7			K_8		2
13	5			K_9	K_{10}		K_{11}	3
19	6					K_{12}		1

Рис. 6. Модель структуры кинематической цепи – матрица связей $A_{[6]}$ графа структуры: 1, 6 – терминальные элементы; 4–6 – промежуточные элементы; K_i – коммутирующие элементы

Отличие матрицы связей от матрицы смежности заключается в том, что ее элементы не только отражают наличие связи между элементами компонентов ОС, а также вид и характеристику связи. Фигурирующие в матрице связей символы элементов рассматриваются как логические элементы, принимающие значения в соответствии с соотношением для кода преобразования свойств среды ($g_{\alpha\mu}$), если при передаче потока энергии от полюса α к полюсу μ элемента v_i ее параметр изменил значение

$$g_{\alpha\mu} = \left[\frac{r_{\mu}^{\omega}}{r_{\alpha}^{\omega}} \right], \quad (1)$$

где r^{ω} – обобщенный кодовый показатель;
 r_{μ}^{ω} – кодовый показатель параметра потока энергии на μ -м (выходном) полюсе элемента v_i ;
 r_{α}^{ω} – кодовый показатель параметра потока энергии на α -м (входном) полюсе элемента v_i ;
 $]x[$ – символ, означающий представление « x » в виде простой дроби.

Таким образом, модель структуры представлена логическим графом и соответствующей ей логической матрицей. В компонентах ЭМП ОС МКА при их функционировании, в зависимости от команд управления и возможных нештатных срабатываний структурно-функциональных элементов, происходят изменения, которые моделируются следующим образом: исключение вершин (выключение или нештатное функционирование элемента); исключение ребер (разрыв связи между элементами при их выключении или нештатном функционировании); появление вершин постоянной проводимости (переход элементов в нештатное состояние); превращение промежуточной вершины в терминальную (потеря непрерывности кинематической цепи).

Перечисленные изменения в структуре компонентов ОС, имеющие место при ее функционировании, адекватно моделируются моделью-графом «тактовых структур» или, что то же самое, динамическим графом $G_k(V_k, X_k, T)$, состав вершин и ребер которого зависит от тактового времени T функционирования компонента.

Динамические графы имеют те же формы отображения, что и обычные графы, т. е. логический граф тактовой структуры можно отобразить в виде тактовой логической матрицы связей, в которой отражается логика изменений структуры компонента в каждой операции. Данная матрица по своему функциональному содержанию отражает возможные изменения структуры компонентов ОС при функционировании.

СТРУКТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОНЕНТОВ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ СИСТЕМ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Функциональные свойства механических, электрических и информационных компонентов ЭМП ОС МКА существенным образом зависят от структуры компонентов, однако возможно установить связь между структурными характеристиками компонентов и выходными параметрами компонентов, а также выполняемыми ими функциями. Для этого используются следующие параметры:

– число n_v вершин графа k -го компонента характеризует число элементов v_i компонента и при наличии стоимостных, массогабаритных, временных и других характеристик позволяет определить стоимость, массу, занимаемый объем, затраты на изготовление, испытания,

транспортировку и обслуживание элементов. Минимизация числа вершин приводит к получению компонентов, выполняющих заданные функции минимальным числом элементов;

– число n_x ребер графа k -го компонента характеризует число связей элементов, а следовательно, способность компонента при функционировании в нештатном состоянии к изменению структуры для вывода в штатное или безопасное состояние. Производной от предыдущих характеристик является число σ_i связей элемента v_i k -го компонента, называемое в теории графов степенью вершины и определяемое по матрице смежности,

$$\sigma(v_i) = \sum_{j=1}^{j^*} a_{ij}. \quad (2)$$

Эта величина характеризует влияние функциональных свойств элемента на функциональные свойства компонента: чем больше связей имеет элемент, тем больше влияние его свойств на свойства компонента и тем большее значение имеет функция данного элемента в составе целевой функции компонента;

– смысл цикломатического числа $\Psi(G)$ графа структуры k -го компонента (наибольшее число независимых циклов), который заключается в создании минимального количества связей (при удалении которых размыкаются все циклы в структуре), характеризующего резервированность, гибкость и живучесть k -го компонента;

– число $\alpha(G)$ внутренней устойчивости графа (максимальное число несвязанных вершин), характеризующее автономность функционирования элементов, а значит, и живучесть, и возможность выполнения нескольких операций одновременно. Чем больше $\alpha(G)$, тем большая часть управляющей системы остается работоспособной при разрушении (потере прочности) части элементов;

– число $\beta(G)$ внешней устойчивости графа (минимальное число вершин, с которыми смежны остальные вершины), используемое при минимизации числа элементов контроля и управления. Эта характеристика может служить для определения мест установки элементов контроля состояния ЭМП. Показатель $\beta(G)$ определяет число датчиков, а вершины минимального внешне устойчивого подмножества указывают конкретные места установки датчиков контроля. Если использовать этот принцип, то получается система элементов контроля, позволяющая проверить параметры ЭМП в любой его части с включением не более одного коммутирующего элемента;

– число $n(G)$ ребер графа k -го компонента, образующих подмножество ребер, называемое минимальным разрезом графа, удаление которых из графа разрывает все пути графа, но введение хотя бы одного любого ребра этого подмножества приводит к образованию хотя бы одного пути. Данное число характеризует возможность выполнения компонентом целевых функций в нештатных состояниях и используется при анализе функционирования компонента в нештатных состояниях.

Большая часть перечисленных характеристик используется на этапе проектирования ЭМП ОС МКА, в силу их чувствительности к изменениям структуры, что позволяет выполнять анализ нештатных состояний ЭМП ОС МКА уже на начальных этапах исследований.

МОДЕЛИ ОПЕРАЦИЙ КОМПОНЕНТОВ АГРЕГАТА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ СИСТЕМ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Наиболее распространенными в ЭМП ОС МКА являются механические и электрические системы, которые с позиций системотехники представляются соответственно как механические и электрические компоненты. Перечисленные компоненты осуществляют свои функции

путем выполнения множества операций. Операции в подобных компонентах представляют собой процессы хранения, передачи и преобразования свойств энергетических потоков в компонентах. Для каждого компонента ЭМП существует совокупность операций, определенная ее функциональным назначением. В свою очередь, каждой операции соответствует конкретное состояние s_i компонента ЭМП, определяемое состояниями его элементов, взаимным влиянием состояний элементов друг на друга и степенью полноты зависимости данных состояний. Поэтому модели операций должны отражать, с одной стороны, необходимые и достаточные условия, при которых происходят передача и преобразование потоков энергии в компонентах, а с другой стороны – состав элементов, связи между ними, направления движения потоков энергии и информации, а также преобразование их свойств элементами.

Формально логическая связь условий выполнения компонентом определенной операции математически записывается в следующем виде:

$$F_{ij} = F_{ij}(\Pi) \wedge F_{ij}(G) \wedge F_{ij}(A), \quad (3)$$

- где F_{ij} – логическая функция выполнения операции;
 $F_{ij}(\Pi)$ – логическая функция, отражающая работу источников энергии, т. е. наличие энергетического потенциала между элементом-источником v_i и элементом-потребителем v_j , и принимающая значение «1» при наличии потенциала между v_i и v_j или «0» – при его отсутствии;
 $F_{ij}(G)$ – логическая функция проводимости между v_i и v_j , определяемая непосредственно по модели структуры компонента как конъюнкция логических переменных, соответствующих функциональным элементам, через которые проходит поток от источника v_i к потребителю v_j , и принимающая значения: «1» при наличии пути между v_i и v_j или «0» – в противном случае;
 $F_{ij}(A)$ – логическая функция достаточности, отражающая возможность компоненты по преобразованию свойств потоков энергии и информации $F_{ij}(\Omega)$, а также специфику функционирования компоненты $F_{ij}(E)$.

Таким образом,

$$F_{ij}(A) = F_{ij}(\Omega) \wedge F_{ij}(E), \quad (4)$$

где $F_{ij}(\Omega)$ принимает значение «1», если компонент, имея возможности по преобразованию свойств потоков, преобразует их или значение «0» – в противном случае; $F_{ij}(E)$ принимает значение «1», если выполняются требования, учитывающие специфику функционирования компонента, или «0» – в противном случае.

Для учета в моделях операций состава элементов, связей между ними, направлений движения потоков энергии и информации и преобразований их свойств вводятся структурно-логические формулы путей графа структуры. Такое описание операций, в отличие от традиционных их форм представления в виде таблиц операций, не требует при анализе отказов каждый раз обращаться к принципиальным схемам и дает возможность перечислить все нештатные операции, реализуемые при отказах.

Связь модели операции с моделью структуры состоит в том, что элементы, участвующие в операции, образуют пути l_{ij} и циклы l_{ii} в графе структуры между ее терминальными элементами.

Поэтому операция определяется совокупностью терминальных элементов (источников $v_i \in V^T$ и потребителей $v_j \in V^T$); промежуточных функциональных элементов $v_\rho \in V^{np}$; локальных функций передач $f_{\alpha\mu}[s_n(v_i)]$ элементов.

Тогда путь l_{ij} в графе структуры компонентов, с началом в источнике и окончанием в потребителе, является конъюнкцией терминальных и промежуточных функциональных элементов, выполняющих необходимые преобразования свойств энергетического потока, и определяется формулой

$$l_{ij} = v_i^\alpha \wedge v_\rho^{\alpha\mu} \wedge \dots \wedge v_j^\mu, \quad (5)$$

где v_i^α – терминальный элемент-источник с выходным полюсом α ;
 v_j^μ – терминальный элемент-потребитель с входным полюсом μ ;
 $v_\rho^{\alpha\mu}$ – промежуточный элемент с входным полюсом α и выходным полюсом μ .

Указанному пути соответствует структурно-логическая функция $f_{ij}(s(v_\rho), t)$ соединения элементов (функции передачи образованных соединений в зависимости от направления движения потока энергии и его распределения), которая имеет смысл функции преобразования свойств потоков при передаче от источника v_i к потребителю v_j , определяемая как конъюнкция локальных функций передач $f_{\alpha\mu}[s(v_\rho)]$ элементов, образующих путь в графе структуры между источником и потребителем. Тогда

$$f_{ij}(l_{ij}) = f_{\alpha\mu}(v_{i+1}) \wedge f_{\alpha\mu}(v_\rho) \wedge \dots \wedge f_{\alpha\mu}(v_{j-1}). \quad (6)$$

По существу, каждая операция – это определенная совокупность элементарных операций, характеризующихся либо простой передачей энергии или информации от источника v_i к потребителю v_j , либо преобразованием свойств потока в процессе передачи. На графе структуры компонентов элементарная операция описывается одним путем.

Физическая природа потоков и протекающих в компонентах ЭМП ОС МКА процессов накладывает отпечаток на процесс формирования структурно-логических формул путей в графах структур, что, с одной стороны, отражает характер соединения элементов (последовательное, параллельное, смешанное), а с другой стороны – условия срабатывания элементов.

Таким образом, структурно-логические формулы сложных операций могут иметь как конъюнктивный, так и дизъюнктивный, а также и конъюнктивно-дизъюнктивный характер.

Модель операции отображается ориентированным графом $G_i(s(v_i), t)$ и соответствующей ему матрицей $F[i, j]$, строки которой соответствуют терминальным вершинам-источникам $v_i \in V^T$, столбцы – терминальным вершинам-потребителям $v_j \in V^T$. Элементы $f_{ij}(s(v_\rho), t)$ матрицы $F[i, j]$ содержат описание функций соединений элементов, характеризующих передачу и преобразование потоков при передаче от вершины-источника v_i к вершине-потребителю v_j .

Для учета реальной возможности совмещения нескольких непротиворечиво реализуемых элементарных процессов формируются условия их совместности, формируемые отдельно для каждой группы компонент ЭМП ОС МКА с признаком физической однородности.

Совокупность компонента ЭМП ОС МКА описывается терминальной матрицей операций

$$F_{[i^*, j^*]}(t) = \bigcup_{s=1}^{s^*} F_{[i, j]}(s(v_i), t), \quad (7)$$

где i^*, j^* – общее число источников и потребителей соответственно;
 S^* – общее число операций компонента, при этом $S^* = 2^{n^*}$, где

$$n^* = \sum_{i=1}^{i^*} \sum_{j=1}^{j^*} n_{ij}.$$

Здесь n_{ij} – общее число элементарных операций между источником v_i и потребителем v_j .

Элементы матрицы $F_{[i^*, j^*]}$ представляют собой описание структурно-логических формул элементарных операций и совокупности двух и более элементарных операций. Каждому элементу матрицы соответствуют: граф $G_i(s(v_i), t)$ для элементарного режима либо граф $G_s = \bigcup_{s=1}^{s^*} G_i(s(v_i), t)$ для совокупности элементарных операций.

Терминальная матрица элементарных операций для кинематической цепи редуктора, представленной на рис. 2, показана на рис. 7.

	v_1	v_{19}
v_1		3B1-3B2-3B3-B2-B3-3B7-3B4-B4-3B5-3B6-B5-3B8-3B10-B6-3B9-B6-3B11-3B12-B7
v_{19}	3B1-3B2-3B3-B2-B3-3B7-3B4-B4-3B5-3B6-B5-3B8-3B10-B6-3B9-B6-3B11-3B12-B7	

Рис. 7. Терминальная матрица операций кинематической цепи

Спецификой при построении модели операций является учет возможности реализации «ложных» потоков при отказах элементов (например, при отказе коммутатора в открытом состоянии могут реализовываться потоки к другим потребителям). Такие условия учитываются в виде инверсии логических функций проводимости.

Перечисление всех реализуемых компонентом операций осуществляется перечислением известными в теории графов методами всех путей в графе структуры между терминальными вершинами. Затем проводится анализ совместной реализуемости групп потоков, в результате чего формируется множество операций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в статье математические модели описания функционирования ЭМП ОС МКА включают модели структур и операций. Такие модели предназначены для того, чтобы описывать появление и развитие возможных нештатных ситуаций с целью обоснования принимаемых решений по управлению находящимися в нештатных состояниях ЭМП ОС МКА.

Список используемых источников

1. Голиков И. О., Гранкин Б. К. Структурные методы проектирования агрегатов технологического оборудования. – 1996, МО СССР. – 56 с.
2. Алиев Т. И. Основы проектирования систем: учеб. пособие / М-во образования и науки РФ; Ун-т ИТМО. – СПб., 2015. – 120 с.
3. Селиванов В. А. Системы управления электроприводами: учеб. пособие. – Могилев, 2010. – 275 с.

4. Трохименко Я. К. Метод обобщенных чисел и анализ линейных цепей. – М.: Сов. радио, 1972. – 134 с.
5. Сушков Ю. А. Графы зубчатых механизмов. – Л.: Машиностроение, 1983. – 215 с.
6. Некрасова М. Г. Дискретная математика: учеб. пособие. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», 2013. – Ч. 2: Теория графов, элементы теории конечных автоматов. – 108 с.

А. В. Астапович,
кандидат технических наук, доцент;
Д. А. Куничкин;
С. Н. Печников;
А. В. Прокофьев,
кандидат технических наук, доцент

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОННЫХ ТАХЕОМЕТРОВ В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ

В статье обоснован метод определения метрологических характеристик электронных тахеометров, который позволяет непосредственно на объекте измерения выявлять величину постоянной систематической погрешности измерений углов, оценивать точность полученных результатов и представлять материалы обработки углов на станции в виде ряда равнозначных независимых направлений. Представлены простые и удобные формулы для вычисления метрологических характеристик измерений модернизированным способом во всех комбинациях горизонтальных углов на пункте геодезической сети, а также приведены результаты экспериментальной проверки.

Ключевые слова: горизонтальный угол, метрологические характеристики, систематическая погрешность, способы измерений горизонтальных углов, точность измерений, электронный тахеометр.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в геодезическом производстве практически закончен переход от оптических к оптико-электронным средствам измерений и спутниковым технологиям. На рынке появился с принципиально новыми конструктивными решениями большой ассортимент электронных тахеометров, которые находят широкое применение в создании геодезических сетей специального назначения. В этой связи при развитии прецизионных геодезических сетей электронными тахеометрами важной задачей, которая требует решения, являются поиск и разработка новых методов и средств контроля метрологических характеристик прибора непосредственно на объекте производства измерений. Это обусловлено высокими требованиями к достоверности и точности измерений электронными тахеометрами, особенно при геодезическом обеспечении строительства уникальных объектов различного назначения, в том числе для освоения космического пространства и обеспечения обороны страны.

Проводить всесторонние исследования геодезических приборов важно не только для фирм-производителей, сервисных центров по обслуживанию приборов, научно-исследовательских институтов, но и для исполнителя геодезических работ, который должен обеспечить необходимую точность измерений для успешного решения поставленных задач.

При исследовании электронных тахеометров в лабораторных условиях точность при поверке угломерной части составляет десятые, иногда даже сотые доли угловой секунды. Высокая точность поверок обеспечивается использованием специальных метрологических стендов со значительным уровнем автоматизации на основе микропроцессорной техники [5]. При этом большое значение уделяется оценке и учету влияния нестабильности конструкции стенда в целом и отдельных составных частей, что является существенным недостатком данного метода поверок.

Совершенствованию стендов и созданию новых систем и методов лабораторных исследований электронных геодезических приборов посвящено много публикаций [5]. Но вопрос о том, как проводить исследования электронных тахеометров для оценки метрологических характеристик измерений горизонтальных углов, когда специальной лаборатории нет, практически не рассматривается в литературе, что и обуславливает актуальность темы данной ста-

ты. В статье изложен способ определения метрологических характеристик электронных тахеометров, который позволяет:

- непосредственно на объекте измерения выявлять постоянную систематическую погрешность измерений углов;
- оценивать точность полученных результатов;
- представлять материалы обработки углов на станции в виде ряда равноточных независимых направлений.

ОПИСАНИЕ МЕТОДА

В прецизионных линейно-угловых сетях значения углов получают в результате совместной обработки наблюдений на станции при составлении сводов измеренных величин. Результаты угловых измерений представляют в виде ряда направлений или в виде ряда необходимых углов. Каждому виду представления результатов угловых измерений при уравнивании геодезических построений должна ставиться в соответствие корреляционная матрица ошибок. Так, например, равноточным независимым направлениям M_1, M_2, M_3, M_4 (рис. 1) ставится в соответствие единичная корреляционная матрица Q_M .

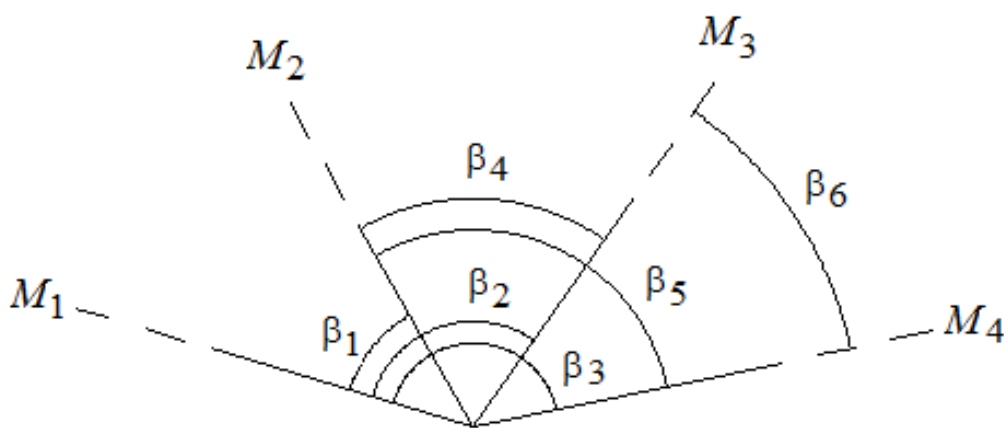


Рис. 1. Схема угловых измерений

В то же время результаты данных угловых измерений могут быть представлены рядом углов, например, от начального направления

$$\begin{aligned}\beta_1 &= M_2 - M_1; \\ \beta_2 &= M_3 - M_1; \\ \beta_3 &= M_4 - M_1.\end{aligned}$$

Поскольку углы выражаются функциями направлений, то корреляционная матрица ошибок данных углов будет иметь вид

$$Q_\beta = FQ_M F^T = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix}.$$

где F – матрица частных производных оцениваемых функций.

Для смежных углов

$$\begin{aligned}\beta_1 &= M_2 - M_1, \\ \beta_4 &= M_3 - M_2, \\ \beta_6 &= M_4 - M_3\end{aligned}$$

и будем иметь

$$Q_{\beta} = FQ_M F^T = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 \\ -1 & 2 & -1 \\ 0 & -1 & 2 \end{bmatrix}.$$

Таким образом, ошибки углов, имеющие общее направление, являются коррелированными величинами.

Обобщая все вышеизложенное, можно сделать вывод, что n независимых направлений с единичной корреляционной матрицей ошибок могут представляться рядами необходимых углов

$$\begin{aligned} \beta_1 &= M_2 - M_1; \\ \beta_2 &= M_3 - M_1; \\ &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ \beta_{n-1} &= M_n - M_1 \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} \beta_1 &= M_2 - M_1; \\ \beta_2 &= M_3 - M_2; \\ &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ \beta_{n-1} &= M_n - M_{n-1} \end{aligned}$$

с корреляционными матрицами ошибок соответственно:

$$Q_{\beta} = \begin{bmatrix} 2 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 2 & \dots & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 1 & \dots & 2 \end{bmatrix}, \quad Q_{\beta} = \begin{bmatrix} 2 & -1 & \dots & 0 & 0 \\ -1 & 2 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 2 & -1 \\ 0 & 0 & \dots & -1 & 2 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Справедливо будет и обратное утверждение. Если при уравнивании измерений на станции получены результаты с корреляционными матрицами ошибок углов, подобными виду (1), то такие результаты можно представлять в виде ряда равнооточных независимых направлений.

Угловые величины в геодезических сетях измеряются, как правило, способом круговых приемов (способ Струве) и способом во всех комбинациях (способ Шрейбера). Реже используется видоизмененный способ в комбинациях (способ Томилина), способ неполных приемов (способ Аладжалова) и способ симметричных комбинаций направлений.

Выполненные аналитические исследования показали, что данные способы измерений не могут без введения дополнительных параметров при уравнивании углов на станции оценивать и исключать постоянные систематические ошибки, а также не могут обеспечить представление полученных результатов рядом равнооточных независимых направлений. Это обстоятельство существенно снижает эффективность использования имеющихся на рынке программных продуктов для уравнивания методом наименьших квадратов геодезических сетей, создаваемых на основе угловых измерений, поскольку данные программы не учитывают коррелированность ошибок угловых величин. Поэтому в качестве главных требований к разработке метода определения метрологических характеристик угловых измерений были выдвинуты следующие:

– возможность контроля метрологических характеристик непосредственно в процессе измерения углов на геодезическом пункте;

– определение метрологических характеристик в результате простых математических преобразований результатов измерений отдельных углов;

- применение методики измерений горизонтальных углов, которая не должна требовать составления специальных программ наблюдений;
- возможность представления результатов измерений рядом независимых равноточных направлений;
- возможность исключения постоянных систематических ошибок из результатов угловых измерений.

За основу при разработке метода определения метрологических характеристик принят модернизированный способ измерения углов во всех комбинациях, в котором измеряют попарно углы по всему горизонту между всеми парами направлений, идущих с данного пункта. Таких углов составляется $n(n - 1)$, где n – число направлений на пункте. Углы измеряются независимо друг от друга с одинаковой точностью. Для случая, представленного на рис. 2, на пункте измеряются $5(5 - 1) = 20$ следующих углов:

$$\begin{array}{ll}
 \beta_1 = M_2 - M_1; & \beta_{11} = M_1 - M_3; \\
 \beta_2 = M_3 - M_1; & \beta_{12} = M_2 - M_3; \\
 \beta_3 = M_4 - M_1; & \beta_{13} = M_5 - M_4; \\
 \beta_4 = M_5 - M_1; & \beta_{14} = M_1 - M_4; \\
 \beta_5 = M_3 - M_2; & \beta_{15} = M_2 - M_4; \\
 \beta_6 = M_4 - M_2; & \beta_{16} = M_3 - M_4; \\
 \beta_7 = M_5 - M_2; & \beta_{17} = M_1 - M_5; \\
 \beta_8 = M_1 - M_2; & \beta_{18} = M_2 - M_5; \\
 \beta_9 = M_4 - M_3; & \beta_{19} = M_3 - M_5; \\
 \beta_{10} = M_5 - M_3; & \beta_{20} = M_4 - M_5.
 \end{array}$$

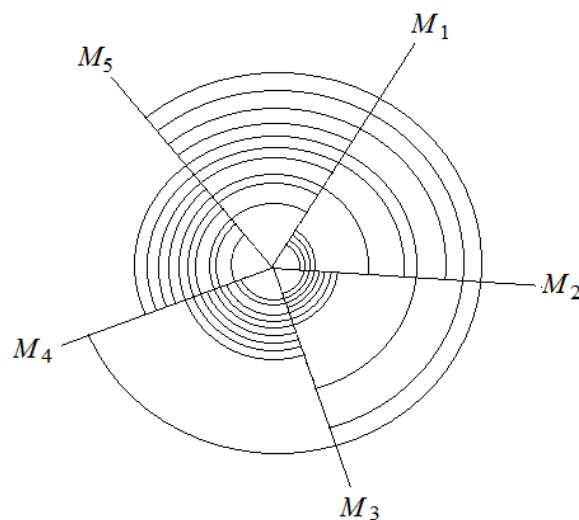


Рис. 2. Схема измерения углов во всех комбинациях по всему горизонту

При уравнивании измерений на станции вес углов будем выражать через вес направления. Тогда вес измерений углов будет равен 0,5 и весовая матрица для независимых уравниваемых углов станет равной $P = 0,5E$ (E — единичная матрица размеров 20×20).

Положим, что систематические ошибки в результатах измерений отсутствуют. Тогда, принимая в качестве параметров углы от начального направления M_1 , будем иметь систему уравнений поправок

$$v = B\tau - l. \quad (2)$$

В выражении (2) введены следующие обозначения: τ – вектор поправок к предварительным значениям параметров, l – вектор свободных членов параметрических уравнений поправок, B – матрица коэффициентов уравнений поправок,

$$B^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}.$$

В системе нормальных уравнений неизвестных

$$B^T P B \tau - B^T P l = 0 \quad (3)$$

матрица коэффициентов при неизвестных τ в общем случае равна

$$B^T P B = \begin{bmatrix} n-1 & -1 & \dots & -1 \\ -1 & n-1 & \dots & -1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -1 & -1 & \dots & n-1 \end{bmatrix}.$$

Для рассматриваемого примера будем иметь

$$B^T P B = \begin{bmatrix} 4 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 4 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 4 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & 4 \end{bmatrix}.$$

Решением уравнений (3) является вектор

$$\tau = (B^T P B)^{-1} B^T P l. \quad (4)$$

Для уравненных углов, отсчитываемых от начального направления (рис. 2), корреляционная матрица ошибок, будет следующей:

$$Q_\tau = (B^T P B)^{-1} = \begin{bmatrix} 0,4 & 0,2 & 0,2 & 0,2 \\ 0,2 & 0,4 & 0,2 & 0,2 \\ 0,2 & 0,2 & 0,4 & 0,2 \\ 0,2 & 0,2 & 0,2 & 0,4 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Сравнивая полученный результат (5) с выражением (1) нетрудно заметить подобие матриц. Следовательно, уравненные углы, измеренные способом во всех комбинациях по всему горизонту, могут быть представлены рядом равноточных независимых направлений.

Выполним анализ результатов уравнивания с учетом систематических ошибок углов. Для этого модель постоянных систематических ошибок в результатах измерений углов примем как

$$c_x = C\eta = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \dots \\ 1 \end{bmatrix} \eta.$$

Для исключения систематических ошибок представим уравнения поправок (2) в виде двухгрупповой модели

$$v - C\eta = B\tau - l \Rightarrow v = B\tau + C\eta - l, \quad (6)$$

которой ставится в соответствие система нормальных уравнений

$$\begin{bmatrix} B^T P B & B^T P C \\ C^T P B & C^T P C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau \\ \eta \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} B^T P l \\ C^T P l \end{bmatrix} = 0. \quad (7)$$

где η – параметр модели систематических ошибок измерений.

Поскольку весовая матрица $P = 0,5E$, а матрица C равна единичному вектору, то компоненты матрицы $B^T P C$ представляют собой суммы элементов в столбцах матрицы B , умноженных на 0,5. При измерении углов способом во всех комбинациях по всему горизонту всегда сумма коэффициентов в столбцах матрицы B равна нулю. Следовательно, $B^T P C = \mathbf{0}$ и нормальные уравнения (7) состоят из двух независимых матричных уравнений

$$\begin{cases} B^T P B \boldsymbol{\tau} - B^T P \mathbf{l} = \mathbf{0}; \\ C^T P C \boldsymbol{\eta} - C^T P \mathbf{l} = \mathbf{0} \end{cases} \quad (8)$$

с независимыми решениями:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau} &= (B^T P B)^{-1} B^T P \mathbf{l}; \\ \boldsymbol{\eta} &= (C^T P C)^{-1} C^T P \mathbf{l}, \end{aligned} \quad (9)$$

для которых корреляционные матрицы ошибок равны:

$$Q_{\boldsymbol{\tau}} = (B^T P B)^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{2}{n} & \frac{1}{n} & & \frac{1}{n} \\ \frac{1}{n} & \frac{2}{n} & & \frac{1}{n} \\ & & \dots & \\ \frac{1}{n} & \frac{1}{n} & & \frac{2}{n} \\ & & & & \frac{2}{n} \end{bmatrix}; \quad (10)$$

$$Q_{\boldsymbol{\eta}} = (C^T P C)^{-1} = \frac{2}{n(n-1)}.$$

При числе направлений $n = 5$ будем иметь

$$Q_{\boldsymbol{\tau}} = (B^T P B)^{-1} = \begin{bmatrix} 0,4 & 0,2 & 0,2 & 0,2 \\ 0,2 & 0,4 & 0,2 & 0,2 \\ 0,2 & 0,2 & 0,4 & 0,2 \\ 0,2 & 0,2 & 0,2 & 0,4 \end{bmatrix}; \quad (11)$$

$$Q_{\boldsymbol{\eta}} = (C^T P C)^{-1} = 0,1.$$

Сравнивая выражения (9) с выражениями (4) и (11) с (5), можно сделать вывод, что введение дополнительных параметров для исключения постоянных систематических ошибок приводит к тем же значениям уравненных углов и к корреляционным матрицам ошибок, которые получены ранее, когда предполагалось, что систематических ошибок в результатах измерений нет.

Таким образом, способ во всех комбинациях по всему горизонту позволяет при измерении горизонтальных углов исключать постоянные систематические ошибки и представлять результаты в виде ряда равнооточных независимых направлений.

Оценка параметра постоянных систематических ошибок измерений способом во всех комбинациях по всему горизонту находится в результате решения второго уравнения системы (8), в котором свободный член в общем случае определится выражением

$$C^T P \mathbf{l} = \frac{\sum_{i=1}^{n(n-1)} l_i}{2}.$$

С учетом выражения (10) будем иметь

$$\boldsymbol{\eta} = \frac{\sum_{i=1}^{n(n-1)} l_i}{n(n-1)},$$

что соответствует среднему значению свободных членов параметрических уравнений (2)

$$\eta = \frac{[l]}{n(n-1)} = \bar{l}. \quad (12)$$

Как видим, данный способ позволяет не только исключать, но и легко оценивать величину постоянных систематических погрешностей измерений углов.

Таким образом, для оценки постоянных систематических погрешностей измерений углов способом во всех комбинациях по всему горизонту не требуется применять при уравнивании на станции двухгрупповую модель (6). Для этой цели достаточно использовать модель (2).

Для оценки точности уравненных значений углов и параметра модели систематических ошибок измерений η необходимо иметь среднюю квадратическую ошибку единицы веса и обратные веса оцениваемых величин.

Поскольку поправки к результатам измерений углов способом во всех комбинациях по всему горизонту компенсируют и случайные, и систематические ошибки, то оценка средней квадратической ошибки единицы веса μ , вычисленная по поправкам модели (2)

$$\tilde{v} = v - C\eta = B\tau - l$$

будет недоброкачественной – завышенной.

Для вычисления эффективной оценки ошибки единицы веса μ необходимо из поправок \tilde{v} удалить составляющую, которая обусловлена систематическими погрешностями измерений

$$v = \tilde{v} + C\eta.$$

Тогда средняя квадратическая ошибка единицы веса будет оцениваться по формуле

$$\mu = \sqrt{\frac{v^T P v}{n - k}},$$

которую можно представить как

$$\mu = \sqrt{\frac{[v^2]}{2(n-1)^2}}, \quad (13)$$

Величина μ отражает точность измерений направлений

$$m_M = \mu. \quad (14)$$

Точность измерения отдельных углов характеризуется средней квадратической ошибкой m_β , которая определяется выражением

$$m_\beta = m_M \sqrt{2} = \sqrt{\frac{[v^2]}{(n-1)^2}}. \quad (15)$$

Средняя квадратическая ошибка оценки η составит

$$m_\eta = \mu \sqrt{Q_\eta} = \frac{m_M \sqrt{2}}{\sqrt{n(n-1)}} = \frac{m_\beta}{\sqrt{n(n-1)}}. \quad (16)$$

Средняя квадратическая ошибка уравненных на станции значений углов, измеренных способом во всех комбинациях по всему горизонту,

$$m_{\beta'} = \mu \sqrt{Q_{\tau_{i.i}}} = \mu \sqrt{\frac{2}{n}} = \frac{m_\beta}{\sqrt{n}}. \quad (17)$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МЕТОДА

Данный метод был применен для определения метрологических характеристик измерений горизонтальных углов электронным тахеометром *Leica TC 1001*.

Измерения выполнялись одним приемом способом во всех комбинациях по всему горизонту на пункте с шестью направлениями со штатива, установленного специально на обледеленном асфальте.

В результате уравнивания на станции 30 измеренных углов были получены для данных условий следующие значения метрологических характеристик измерений:

- 1) постоянная систематическая ошибка

$$\eta = -4.9'';$$

- 2) средняя квадратическая ошибка параметра η

$$m_{\eta} = \frac{m_{\beta}}{\sqrt{n(-1)}} = 0,76'';$$

- 3) средняя квадратическая погрешность измерений углов

$$m_{\beta} = \sqrt{\frac{[v^2]}{(n-1)^2}} = 4,2'';$$

- 4) средняя квадратическая ошибка уравниваемых на станции углов

$$m_{\beta'} = \frac{m_{\beta}}{\sqrt{n}} = 1,7''.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренный метод наиболее эффективен при определении метрологических характеристик электронных тахеометров и электронных теодолитов непосредственно в полевых условиях на объекте измерений. В данных приборах используется система считывания с измерительных устройств, которая не требует физической перестановки круга.

В связи с конструктивной особенностью данных приборов составление специальных программ наблюдений для подавления ошибок, свойственных оптическим теодолитам, не требуется. Методика наблюдений существенно упрощается, что является благоприятным фактором для внедрения предлагаемого метода в практику метрологических проверок высокоточных современных угловых приборов и измерений горизонтальных углов на пунктах прецизионных геодезических сетей.

Список используемых источников

1. *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.
2. *Большаков В. Д., Гайдаев П. А.* Теория математической обработки геодезических измерений. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Недра, 1977. – 367 с.
3. *Большаков В. Д., Маркузе Ю. И., Голубев В. В.* Уравнивание геодезических построений: справочное пособие.– М.: Недра, 1989. – 413 с.
4. *Губанов В. С.* Обобщенный метод наименьших квадратов. Теория и применение в астрометрии.– СПб.: Наука, 1997. – 318 с.
5. *Гура Д. А.* Разработка методов исследования электронных тахеометров в условиях производства для оценки и повышения точности измерения горизонтальных углов: дис. ... канд. техн. наук. – Краснодар, 2016. – 181 с.

6. Инструкция о построении государственной геодезической сети СССР.– М.: Недра, 1966. – 341 с.
7. *Левитская Т. И.* Лабораторный практикум по высшей геодезии: метод. указания для студентов 3-го курса. – Екатеринбург: Уральский федер. ун-т, 2011. – 60 с.
8. *Малков А. Г.* Высшая геодезия. Высокоточные измерения: учеб.-метод. пособие. – Новосибирск: СГГА, 2011. – 46 с.
9. *Машимов М. М.* Методы математической обработки астрономо-геодезических измерений: учебник. – М.: ВИА им. В. В. Куйбышева, 1990. — 510 с.
10. Геодезия: учебник / А. Ф. Соловьев и [др.]. – МО СССР, 1962. – 422 с.

А. А. Беляков*;

А. И. Шулепов*;

кандидат технических наук

*КМ ИАРКТ Самарского университета, г. Самара.

ВАРИАЦИОННЫЙ МЕТОД ВЫБОРА ПРОЕКТНЫХ МАССОГАБАРИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ВЫСОКООРБИТАЛЬНОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

В статье рассмотрена задача выбора проектных массогабаритных параметров космического аппарата с учётом требования к показателю эффективности – сроку активного существования. Предложен вариационный метод, который позволяет описать модель изменения проектных характеристик в процессе проектирования и получить картину их эволюции. Также уделяется внимание трансформации конструктивного облика, что показано на примере космического аппарата.

Ключевые слова: космический аппарат, орбитальная спутниковая группировка, баллистический коэффициент, срок активного существования, проектные параметры, конструктивный облик, габариты, масса.

В настоящее время, на основе сообщений различных информационных агентств, можно сделать вывод, что в мире активно проектируется ряд спутниковых систем различного назначения, космический сегмент которых выполнен на базе космических аппаратов (КА). Наблюдается тенденция увеличения числа запусков спутников университетами и частными компаниями, поэтому наибольший интерес представляют исследования новых космических систем, состоящих из космических аппаратов научно-исследовательского и народно-хозяйственного назначения.

Логично полагать, что на этапе баллистического проектирования любого КА проводится оптимизация его проектных параметров. Но, несмотря на это, довольно редко на уровне моделей анализируется влияние требований к показателям эффективности на проектные характеристики и конструктивный облик КА. Например, на срок активного существования значительно влияют масса бортовых систем и степень их надежности. Чтобы связать такой показатель эффективности с проектными параметрами КА, в статье предложен авторский метод выбора массогабаритных характеристик и показано, как может изменяться срок активного существования спутника при варьировании баллистического коэффициента через его массу и площадь миделя сечения корпуса при проектировании. Таким образом, задача заключается в том, чтобы обеспечить минимальное значение баллистического коэффициента.

Дело в том, что малое сопротивление атмосферы является постоянно действующей силой и за большие временные интервалы может существенно изменить элементы орбиты, на которую выводятся КА. Например, спутник, движущийся по эллиптической орбите, встречает максимальное сопротивление в своем перигее, где плотность среды максимальна. На каждом витке спутник входит в более плотные слои атмосферы и выходит из них с меньшей скоростью. Поэтому его апогей снижается быстрее, чем перигей. С каждым витком орбита спутника всё больше приближается к круговой. Достигнув круговой орбиты, спутник далее спускается по спирали. По мере уменьшения высоты полета резко возрастает влияние сопротивления воздуха на движение КА. Конечным результатом воздействия сопротивления воздуха является падение спутника на Землю. В связи с этим срок активного существования может быть увеличен за счет варьирования баллистического коэффициента КА путем изменения площади миделя сечения корпуса и снижения массы КА.

Для проектных баллистических расчетов модель плотности атмосферы Земли в первом приближении принимается изотермической и однородной, ее параметры подбираются согласно работе [1]. Для обнуления возмущения, вызванного неправильной формой Земли,

наклонение орбиты принимается стандартным. Это позволяет избежать векового ухода аргумента перигея, вызываемого нецентральностью поля тяготения планеты.

Руководствуясь приведенными выше допущениями, время существования КА можно приближенно рассчитать для низкой круговой орбиты по известной формуле [2]

$$t_{\text{сущ}} = \frac{F(H_0)}{\sigma}. \quad (1)$$

Здесь H_0 – начальная высота полета;

$F(H_0)$ – функция индекса солнечной активности от начальной высоты полета, которую находим по [1];

σ – среднее значение баллистического коэффициента КА, рассчитанное по следующей формуле [2]:

$$\sigma = \frac{C_{Xa} S_{M \text{ КА}}}{2M_{\text{КА}}}, \quad (2)$$

где $M_{\text{КА}}$ – проектная масса КА;

$S_{M \text{ КА}}$ – проектная площадь миделя сечения корпуса КА, которая перпендикулярна вектору скорости полета, взятая для эллиптического приборного отсека;

C_{Xa} – коэффициент лобового аэродинамического сопротивления, который выбирается из диапазона 2–2,5.

Далее предполагается, что проектные площадь миделя и масса КА получали в процессе проектирования бесконечно малые приращения δS_M и δM соответственно. Если под ними понимать допустимые проектные параметры компоновки, то средний баллистический коэффициент получит приращение, главная часть которого будет представлена вариацией. Тогда равенство (2) можно взять за основу для определения σ , согласно которому баллистический коэффициент КА является таким функционалом проектных массогабаритных параметров, вариация которого равна вариации функций геометрии и массы КА. При этом коэффициент лобового аэродинамического сопротивления считается заданным и не зависящим от компоновки. Тогда можно записать вариацию сложного функционала σ двух функций S_M и M [3]:

$$\delta\sigma[S_M, M] = \delta\left(\frac{C_{Xa} S_M}{2M}\right) = \frac{\partial\sigma}{\partial S_M} \delta S_M + \frac{\partial\sigma}{\partial M} \delta M = \frac{C_{Xa}}{2M} \delta S_M - \frac{C_{Xa} S_M}{2M^2} \delta M. \quad (3)$$

В правой части выражения (3) первый компонент представляет собой геометрическую вариацию баллистического коэффициента, а второй – массовую вариацию баллистического коэффициента, где знак минус говорит об уменьшении данного проектного параметра при увеличении массы КА. Таким образом, под допустимыми понимаются произвольные бесконечно малые массогабаритные параметры компоновки, непрерывно меняющиеся при баллистическом проектировании и удовлетворяющие требованиям тактико-технического задания (ТТЗ).

Теперь формулу (3) можно представить в виде

$$\delta\sigma = \delta\sigma_s + \delta\sigma_M, \quad (4)$$

где $\delta\sigma_s$ – геометрическая вариация баллистического коэффициента,

$$\delta\sigma_s = \frac{C_{Xa}}{2M} \delta S_M;$$

$\delta\sigma_M$ – массовая вариация баллистического коэффициента,

$$\delta\sigma_M = -\frac{C_{Xa} S_M}{2M^2} \delta M.$$

Если в равенстве (4) перенести слагаемые из правой части влево, то полученная величина примет вид

$$\delta\sigma - (\delta\sigma_S + \delta\sigma_M) = \delta\sigma + C_{Xa} \delta p_{MG} = \delta p, \quad (5)$$

где p_{MG} – проектный массогабаритный параметр, который необходим для преобразования компоновки в исходное состояние, которое она имела до начала процедуры варьирования, величина C_{Xa} при этом остается неизменной и равной своему окончательному значению,

$$p_{MG} = -\frac{1}{C_{Xa}} (\sigma_S + \sigma_M);$$

p – общий проектный параметр компоновки КА, $p = \sigma + C_{Xa} p_{MG}$.

Из соотношения (5) выведено вариационное уравнение компоновки КА:

$$\delta p = 0. \quad (6)$$

Как следует из анализа формулы (6), вариация конструктивного облика при любых допустимых проектных параметрах равна нулю. Это значит, что для заданных характеристик КА значение функционала p является стационарным и для оптимальной компоновки оно минимально.

Исходя из приведенных выше рассуждений, можно сформулировать вариационный принцип получения компоновки КА: среди всех проектных параметров, допускаемых ТТЗ на КА, в действительности актуальны лишь те, для которых общий проектный параметр компоновки минимален. Если найдены такие параметры M и S_M , которые минимизируют функционал p , то требования ТТЗ будут автоматически удовлетворены.

В практике проектирования довольно часто пользуются методом выбора основных проектных параметров и синтеза конструктивного облика КА на основе последовательного «наращивания» составных частей «вокруг» аппаратуры наблюдения, где вводится некая «фиктивная масса КА» – переменное значение массы КА, получаемое в процессе синтеза массогабаритных параметров бортовых систем и создания конструктивно-компоновочной схемы, которое принимается в качестве проектной массы $M_{КА}$ по завершении последнего итерационного цикла [4]. Процесс расчета геометрических параметров производится аналогично. Считается, что при таком подходе обеспечивается минимум массы КА, причем скорость «схождения» результата довольно быстрая. В данном случае, согласно формуле (3), требуется варьировать фиктивную массу и площадь миделя сечения корпуса до тех пор, пока не будет достигнут минимум общего проектного параметра (6). Следовательно, эти переменные, в свою очередь, тоже являются функционалами, которые предлагается представить интегрально в виде [5]

$$\left\{ \begin{array}{l} M = \int_{\delta R}^{R_{КА}} F \left(R, \Phi(R), \frac{d\Phi(R)}{dR} \right) dR \\ S_M = \pi \int_{\delta R}^{R_{КА}} G \left(R, \Gamma(R), \frac{d\Gamma(R)}{dR} \right) dR \end{array} \right. , \quad (7)$$

где R – варьируемый радиус приборного отсека КА;
 $R_{КА}$ – проектное значение параметра радиуса, взятое по диаметру миделя;
 δR – вариация нижнего допустимого значения параметра радиуса;

- F – градуирующая функция параметра фиктивной массы КА;
- $\Phi(R)$ – массовая функция параметра радиуса;
- G – корреляционная функция параметра фиктивной площади миделя сечения корпуса;
- $\Gamma(R)$ – габаритная функция параметра радиуса.

Наибольшую методологическую сложность имеют поиск и подбор вида записи функций $\Phi(R)$ и $\Gamma(R)$ путем варьирования функционалов (7) с последующим решением дифференциальных уравнений Эйлера – Лагранжа, согласно основной лемме вариационного исчисления. Причем поставленная задача вариационного исчисления имеет подвижную левую границу и закрепленную – правую. Это следует из тех соображений, что при проектировании не известно минимальное ограничение по R , но известны конечные полученные значения проектных массогабаритных параметров. Чтобы разрешить это затруднение, предлагается в первом приближении определить интегрирующие коэффициенты через имеющиеся характеристики массы $M_{КА} = 6840$ кг и радиуса миделя $R_{М КА} = 1,20$ м из источника [6]. Вместе с тем проектное значение $\sigma_{КА} = 0,0008267$ получено по формуле (2) при $C_{\chi_a} = 2,5$. Тогда

$$\begin{cases} M = 5700 \cdot R \\ S_M = \pi R^2 \end{cases} \quad (8)$$

Подобрав вид кривых (8), можно получить картину моделирования баллистического коэффициента и окончательно оценить возможные изменения срока активного существования КА. Результаты варьирования проектных массогабаритных параметров в соответствии с кривыми (8) представлены в виде графиков на рис. 1. На горизонтальной оси отложены значения радиуса миделя сечения корпуса КА. Точкой обозначены исходные проектные параметры.

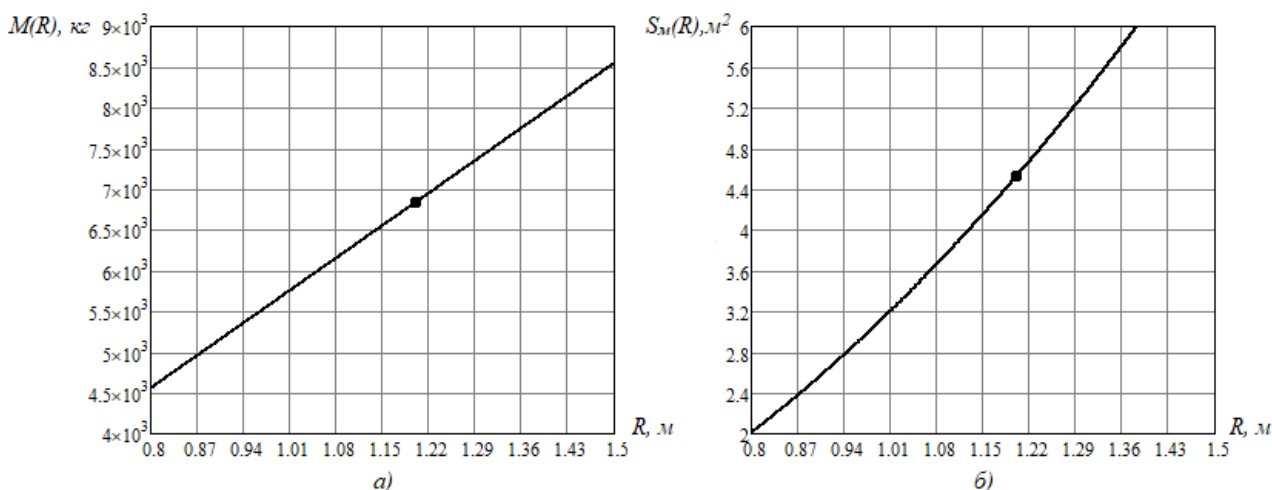


Рис. 1. Проектные массогабаритные параметры:
а – масса КА; б – геометрия КА

В ряде случаев минимально допустимый радиус миделя сечения корпуса КА можно задавать из конструктивных соображений. На каждые 5 см его минимизации будет приходиться уменьшение площади миделя сечения корпуса на $0,369 \text{ м}^2$ и снижение массы на 285 кг. Это существенно, учитывая стандартные габариты бортовой аппаратуры. Следовательно, добиваясь, к примеру, сокращения монтажных зазоров между оборудованием лишь на 1 см, площадь миделя корпуса можно понизить на $0,075 \text{ м}^2$ и выиграть в массе конструкции до 57 кг.

Результаты варьирования баллистического коэффициента и общего проектного параметра компоновки с учетом уравнений (2)–(8) заданы в виде функциональных зависимостей от радиуса миделя на рис. 2 и 3 при разных $C_{X\alpha}$. Точкой указана граница для варьирования параметров исходной компоновки.

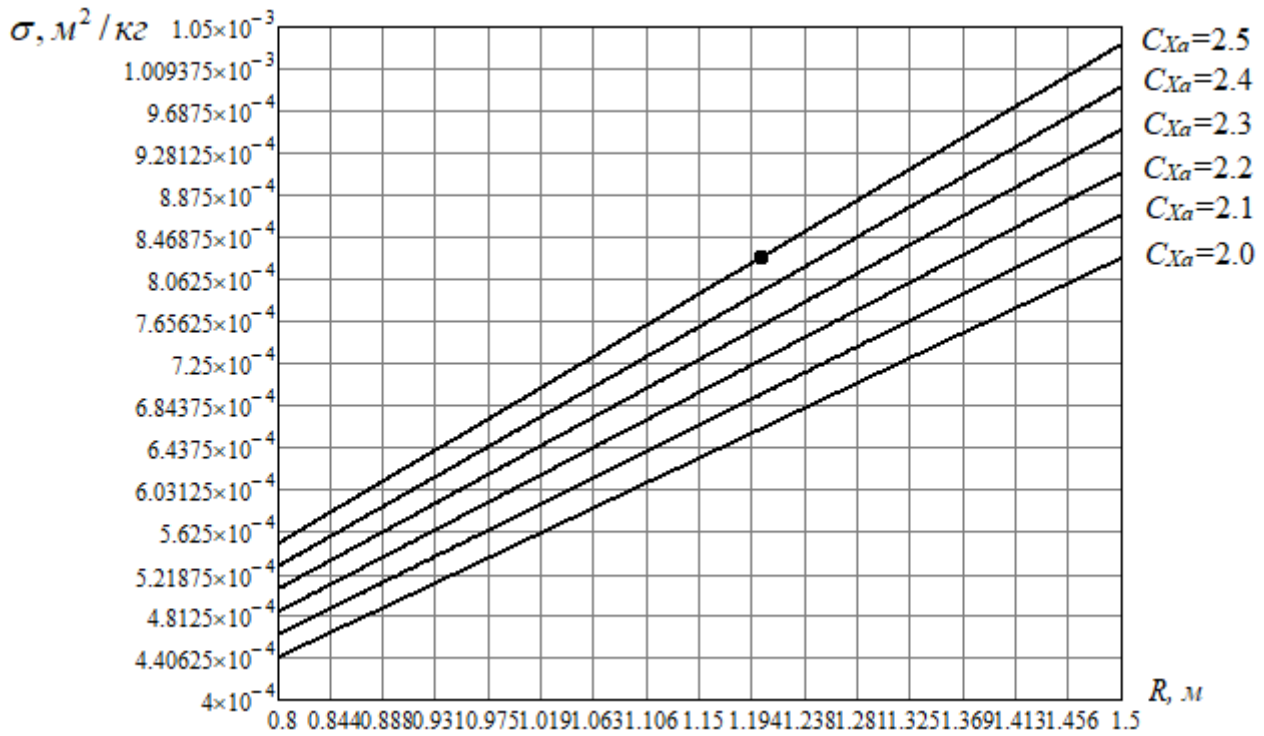


Рис. 2. Вариации баллистического коэффициента КА

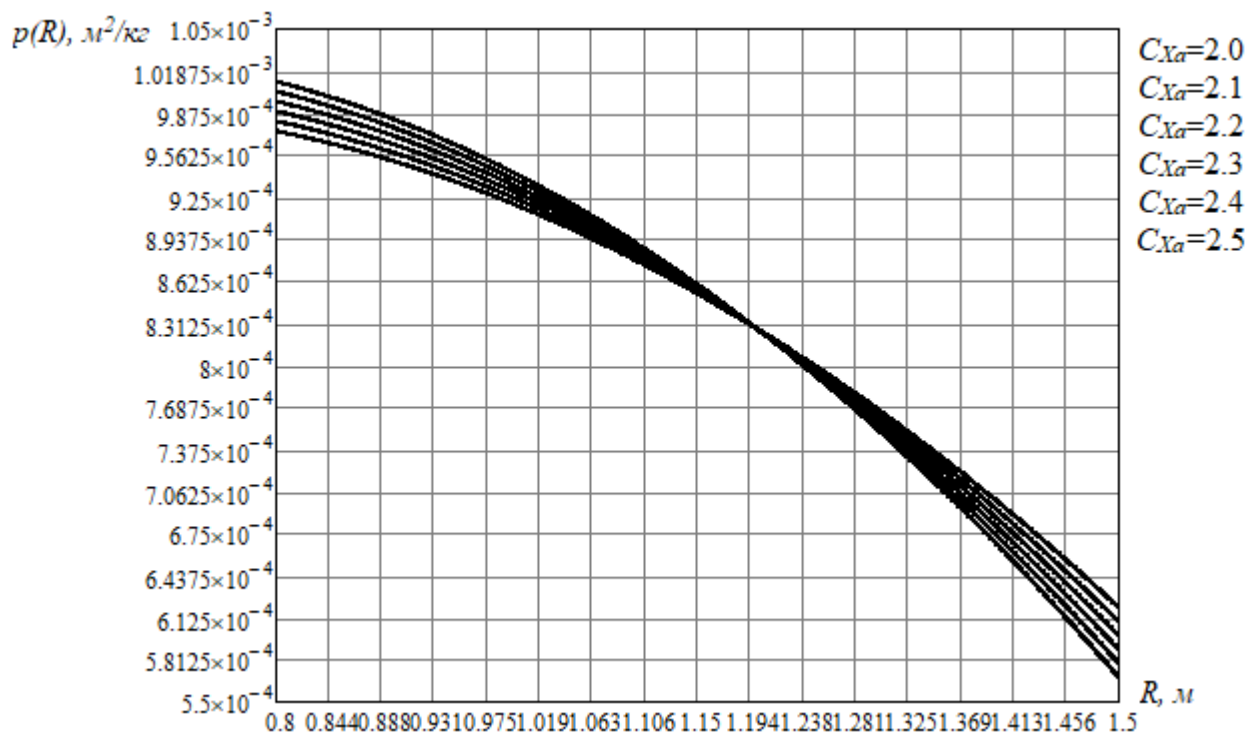


Рис. 3. Вариации общего проектного параметра компоновки КА

Из анализа рис. 2 и 3 видно, что при данном верхнем ограничении на R минимум для p будет достигнут здесь же, на правой границе сегмента варьирования. При этом σ будет иметь наибольшее значение. Скорее всего, это связано с тем, что изменение R приводит к изменению многих проектных параметров. Однако, если рассмотреть связь общего проектного параметра с площадью миделя сечения приборного отсека КА в целом, то будет получена картина, как на рис. 4 при различных C_{xa} .

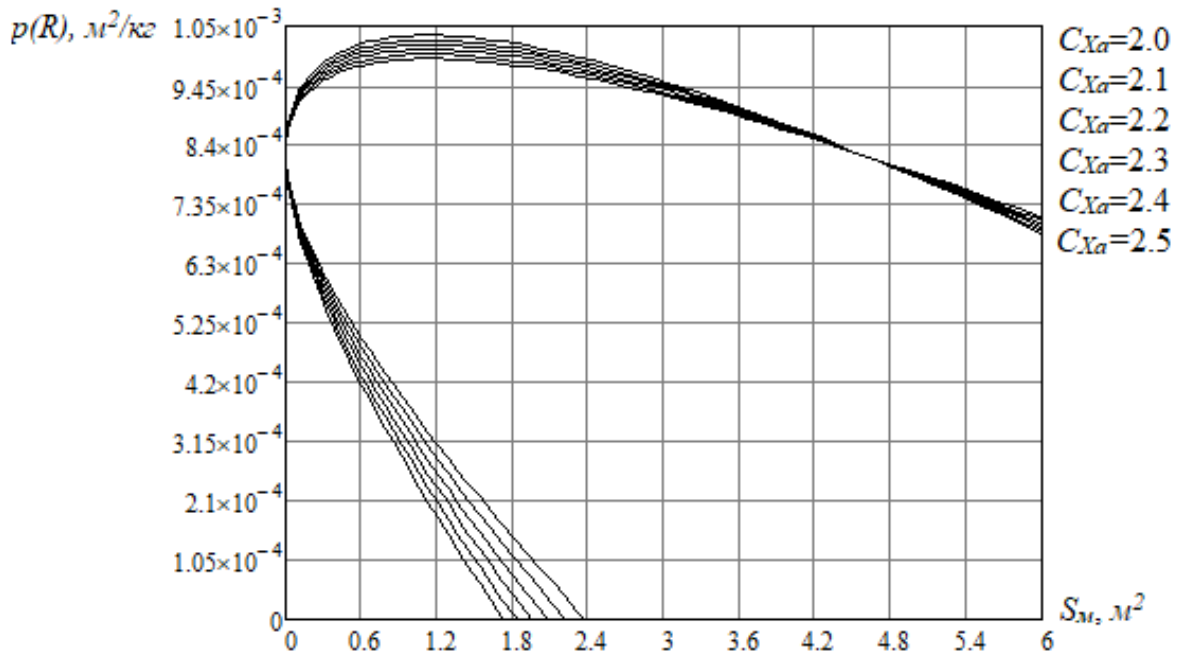


Рис. 4. Зависимость общего проектного параметра от площади миделя КА

Тогда, судя по графику, можно сказать, что задача проектирования имеет два решения для общего проектного параметра при уменьшении площади миделя сечения до диапазона от $1,7 \text{ м}^2$ до $2,4 \text{ м}^2$, одно из которых для выбранного C_{xa} дает искомый минимум уравнению (6). Если этого технически невозможно достичь, то следует ориентироваться по верхней ветви функционального графика, и тогда снова будет получен ответ о том, что исходная проектная компоновка является оптимальной.

Далее, на рис. 5 отображены результаты расчетов по формуле (1) изменения срока активного существования спутника при изменении его компоновки в результате варьирования проектных массогабаритных параметров для различных коэффициентов лобового аэродинамического сопротивления. Минимальное время существования $t_{\text{сущ}} = 60$ сут. [6] на высоте в перигее порядка $H_{\pi} = 264$ км показано точкой. Оно является одним из ограничений, поэтому при выборе проектных характеристик следует пользоваться критерием минимума массы КА [7].

При расчетах по описанной модели, если конструктивно обеспечивается минимум общего проектного параметра p путем уменьшения площади миделя компоновки КА до $2,4 \text{ м}^2$, срок его активного существования может быть увеличен примерно на 37,3%. При этом повышение $t_{\text{сущ}}$ на 10% требует снижения площади миделя компоновки до $3,733 \text{ м}^2$, т. е. на $0,791 \text{ м}^2$ от имеющейся площади миделя $S_{M \text{ КА}}$, что соответствует уменьшению радиуса R приборного отсека на 11 см.

На рис. 6 показано, как меняется проектный облик КА при минимизации общего проектного параметра для компоновки с $C_{xa} = 2,5$ (панели солнечных батарей погашены).

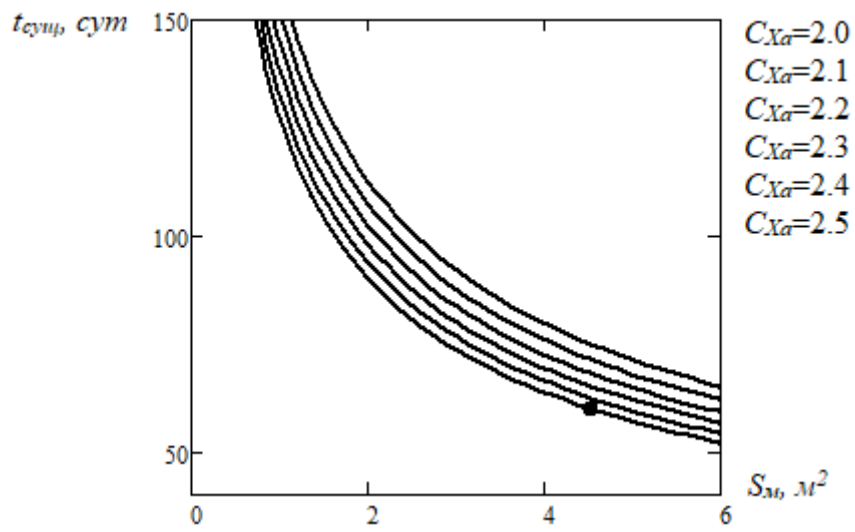


Рис. 5. Срок активного существования КА при изменении площади мишени

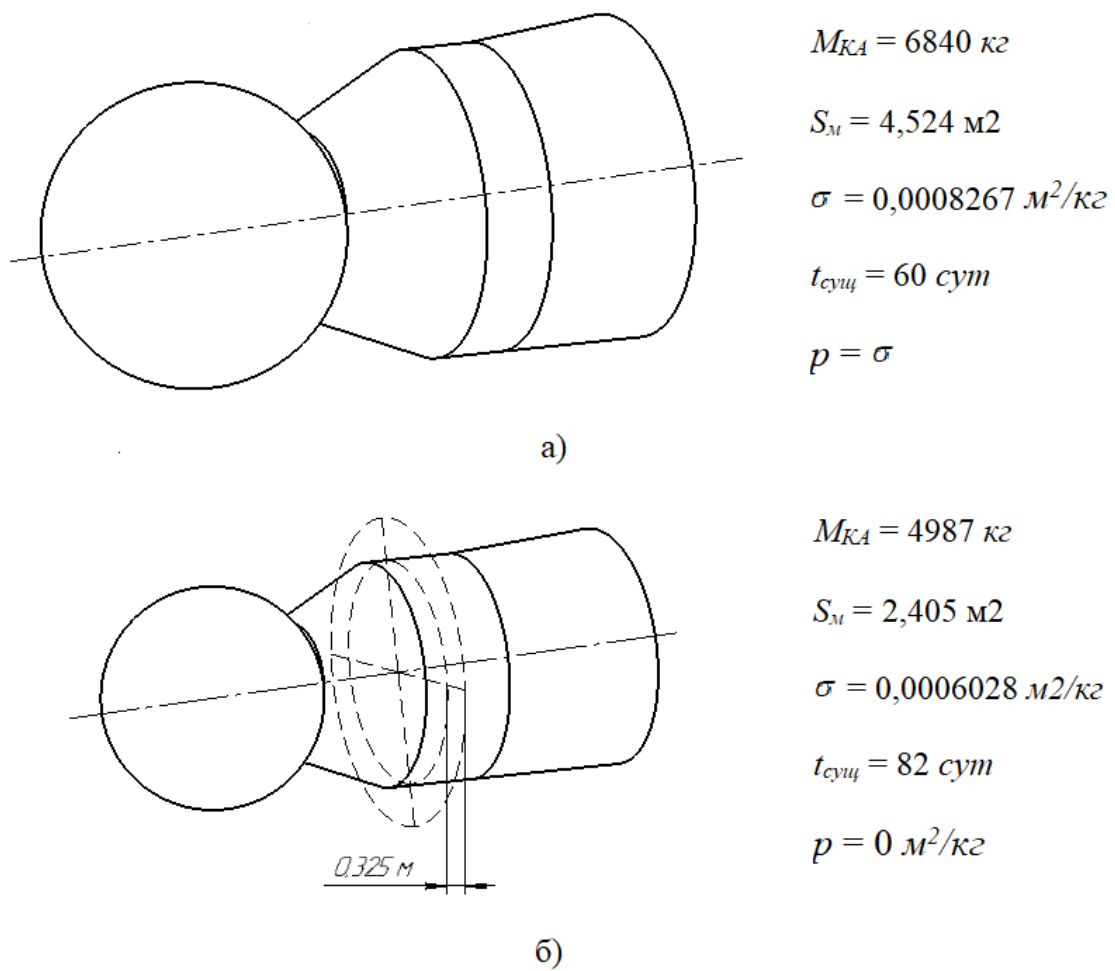


Рис. 6. Проектный облик исследуемого КА:
а – проектный; б – повышенного срока

Минимум общего проектного параметра компоновки КА требует уменьшения площади миделя КА на $2,119 \text{ м}^2$, вследствие уменьшения габаритов приборного отсека. Масса КА сокращается при этом почти на треть – на 1853 кг. Совокупно это позволяет увеличить срок активного существования спутника на 37,1% – от 60 до 82 сут. Радиус приборного отсека должен быть изменен со 120 до 87,5 см. Далее требуется решить, как технически этого можно добиться и возможно ли в принципе. Если данного решения достичь не удастся, например из-за ограничений на габариты КА, то, как вариант, за счет увеличения срока активного существования можно попробовать адаптировать систему электропитания путем уменьшения среднесуточной мощности электропотребления целевой аппаратуры, если это позволяет ТТЗ [8].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, разработан вариационный метод поиска и подбора проектных массогабаритных параметров КА с учетом влияния требований к сроку активного существования в качестве показателя эффективности.

Кроме того, в процессе проектирования рассмотренные характеристики и конструктивный облик изделия непрерывно меняются. Предложенная модель позволяет проследить их эволюцию и подобрать, исходя из технических возможностей, реализации.

Результаты данной работы могут быть использованы при уточнении проектных массогабаритных параметров спутников с учетом функциональной зависимости от срока активного существования при выполнении ими программной миссии в рамках поставленных задач на низких околоземных орбитах.

Список используемых источников

1. ГОСТ 25645.101-83. Атмосфера Земли верхняя. Модель плотности для проектных баллистических расчетов искусственных спутников Земли. – М.: Гос. комитет СССР по стандартам, 1983. – 172 с.
2. Белоконов И. В. Расчет баллистических характеристик движения космического аппарата: учеб. пособие. – Самара: Самар. аэрокосм. ун-т, 1994. – 76 с.
3. Игнатьев Ю. Г., Агафонов А. А. Математические основы физики: математические модели теоретической физики с примерами решения задач в СКМ Maple. – Казань: Казанский ун-т, 2016. – 250 с.
4. Куренков В. И., Салмин В. В., Прохоров А. Г. Методика выбора основных проектных характеристик и конструктивного облика космических аппаратов наблюдения: учеб. пособие. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. – 160 с.
5. Салмин В. В., Лазарев Ю. Н., Старинова О. Л. Методы оптимального управления и численные методы в задачах синтеза технических систем: учеб. пособие. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. – 160 с.
6. Пузин Ю. Я. Основы устройства космических аппаратов: учеб. пособие. – Самара: Изд-во Самарского ун-та, 2020. – 148 с.
7. Волоцув В. В. Модели для расчета проектных параметров низкоорбитального космического аппарата с энергодвигательным электроракетным модулем // Известия Самарского научного центра РАН. – 2011. – № 6-1. – С. 116–125.
8. Волоцув В. В., Ткаченко И. С., Сафронов С. Л. Выбор проектных параметров универсальных платформ малых космических аппаратов // Вестник СГАУ. – 2012. – № 2 (33). – С. 35–47.

А. В. Белянкин,
кандидат технических наук;
А. И. Петухов;
А. Э. Султанов,
кандидат технических наук

ВЛИЯНИЕ КОМПОНОВКИ КОСМИЧЕСКОЙ ГОЛОВНОЙ ЧАСТИ НА ЧАСТОТЫ И ФОРМЫ ПРОДОЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ КОРПУСА РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ

В статье рассмотрены типовые динамические схемы полезного груза, выводимого на орбиту ракетами-носителями. На основе математического моделирования собственных продольных колебаний корпуса ракет космического назначения показано влияние типа динамической схемы космического аппарата и разгонного блока на спектральный состав низкочастотной вибрации. Дано пояснение о роли жесткости закрепления массивных элементов в конструкции космических аппаратов на искажение форм колебаний корпуса ракеты-носителя применительно к различным этапам ее функционирования. Отмечено возможное влияние искажений форм колебаний корпуса на уровень запаса динамической устойчивости.

Ключевые слова: продольные колебания, ракета-носитель, космическая головная часть, формы продольных колебаний.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение динамической устойчивости для ракет-носителей (РН) является одной из основных проблем, решение которой определяет уровень надежности РН как транспортных космических систем. Учитывая сложный характер динамического взаимодействия упругого корпуса РН и системы подачи топлива ее двигательных установок, влияющего на развитие продольных автоколебаний, задача оценки влияния различных конструктивных параметров является значимой. Отдельного рассмотрения в этой связи заслуживает характер динамического взаимодействия ракетных блоков РН и космической головной части. Здесь важно отметить, что РН как средство выведения разрабатывается, с одной стороны, под серию полезных нагрузок, с другой стороны, с учетом особенностей их динамических параметров.

В полете динамическая устойчивость ракеты-носителя к продольным автоколебаниям определяется в конечном итоге динамическими (частотными) характеристиками таких элементов, как корпус, топливные магистрали подачи топлива в двигатель, а также маршевый двигатель. Соотношение свойств усиления и стабилизации колебательных процессов в рассматриваемой автоколебательной системе влияет на запас динамической устойчивости для соответствующего момента полета РН.

Важнейшей особенностью ракеты-носителя, как летательного аппарата переменной массы, является значимое изменение динамических свойств на протяжении этапа выведения полезного груза на орбиту, что означает особый подход к обеспечению продольной устойчивости в задаче ограничения динамического нагружения ее конструкции, а также самого полезного груза. В рамках рассматриваемого подхода важным является оценка влияния типа силовых схем космических аппаратов на динамические параметры корпуса ракеты космического назначения (РКН) в полете.

В контексте сказанного выше обращает на себя внимание анализ данных летных испытаний отечественных ракет-носителей [2]. Так, например, изменения в составе космической головной части РКН достаточно сильно влияют на изменение первого и второго тонов частот собственных продольных колебаний. Данный эффект отражается на общей спектрально-временной картине низкочастотных колебаний (рис. 1,а). Важно при этом отметить, что

сближение частот первого и второго тонов колебаний (рис. 1, б) в конце работы второй ступени приводит к возрастанию амплитуды последней.

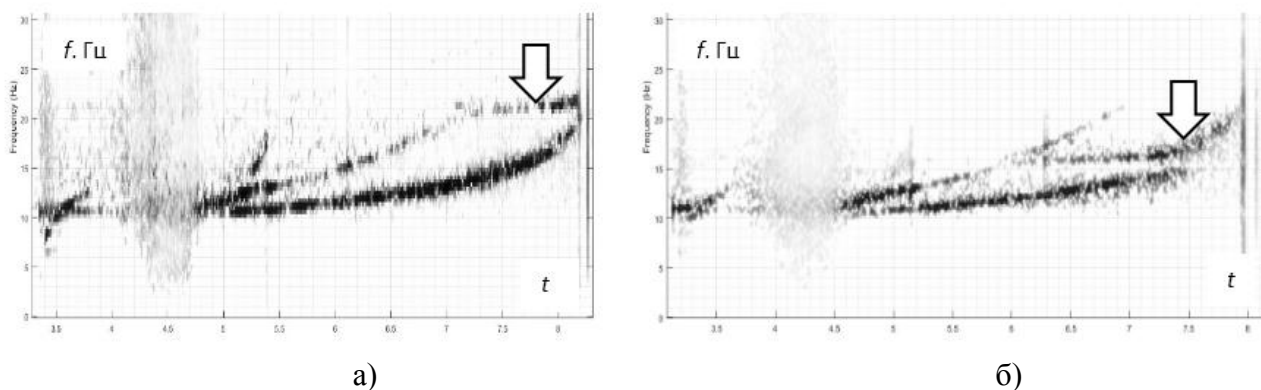


Рис. 1. Влияние изменений в составе РКН типа «Союз-2» на спектральный состав низкочастотной продольной вибрации ее корпуса (для участка работы второй ступени)

Специфика динамического взаимодействия отдельных элементов РКН как упругой конструкции переменной массы проявляется в особенностях влияния малых отклонений жесткости отдельных составных частей на общую спектральную картину продольных колебаний [3, 4]. В этой связи анализ спектральной картины колебаний – как закона распределения энергии упругих деформаций системы через рассмотрение спектрограмм – является показательным и информативным. Таким образом, для проверки адекватности математического моделирования продольных колебаний в целом представляется оправданным привлечение данных телеметрических измерений в рамках летных испытаний РН.

Последствия локальных изменений в конструкции РКН (главным образом, в ее космической головной части) проявляется зачастую неоднозначно. В этой связи оценка влияния таких изменений в РКН на запасы динамической устойчивости, на различных этапах полета, является важной для снижения общей неопределенности в отношении нагрузок, действующих на РКН.

Опираясь на объективные данные телеметрической информации, можно сделать вывод, что решение задачи оценивания влияния отдельных доработок (принятых новых технических решений в РН) на запасы устойчивости по автоколебаниям в отдельных подсистемах становится актуальным. Тот факт, что указанные изменения проявляются через изменение спектрального состава продольной вибрации, позволяет предположить, что данные взаимосвязи могут лечь в основу развития научно-методического аппарата и разработки подходов к повышению достоверности оценки характеристик ракеты-носителя, существенно влияющих на уровень надежности средств выведения.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОДОЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ КОРПУСА РАКЕТЫ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ С УЧЕТОМ СПЕЦИФИКИ ДИНАМИЧЕСКИХ СХЕМ КОСМИЧЕСКОЙ ГОЛОВНОЙ ЧАСТИ

Для адекватной оценки степени влияния конкретного типа силовой схемы космических аппаратов и разгонных блоков, составляющих космическую головную часть, необходимо формализовать их в виде структуры динамической модели того же порядка сложности, что и модель упругого корпуса ракеты-носителя.

В качестве ключевых динамических параметров, отражающих критичные в плане контроля свойства объекта и требующих оценивания по результатам обработки телеметрической информации, можно выделить два параметра [3]:

- коэффициент жесткости k_i для i -го элемента конструкции;
- коэффициент демпфирования h_j для j -й формы продольных колебаний.

Степень влияния упруго подвешенных масс элементов динамической модели определяется соотношением их парциальных частот ω_{si} и частот тонов колебаний всей системы ω_j :

$$f_{nsj} = U_n(l_i) \frac{1}{1 - (\omega_n / \omega_{sj})^2}, \quad (1)$$

где U_n – форма колебаний для сечения в месте закрепления упруго подвешенной массы (УПМ).

Как видно из выражения (1), при определенных условиях даже относительно небольшая масса оказывает существенное влияние на форму колебаний и как следствие – на распределение всей энергии колебаний системы. Этим можно объяснить механизм влияния типа полезного груза на характеристики колебаний всей РКН (рис. 2). Представляет практический интерес выявление критериев значимости влияния распределения параметров жесткости и масс внутри полезного груза на перераспределение энергии продольных колебаний для различных этапов работы двигателей.

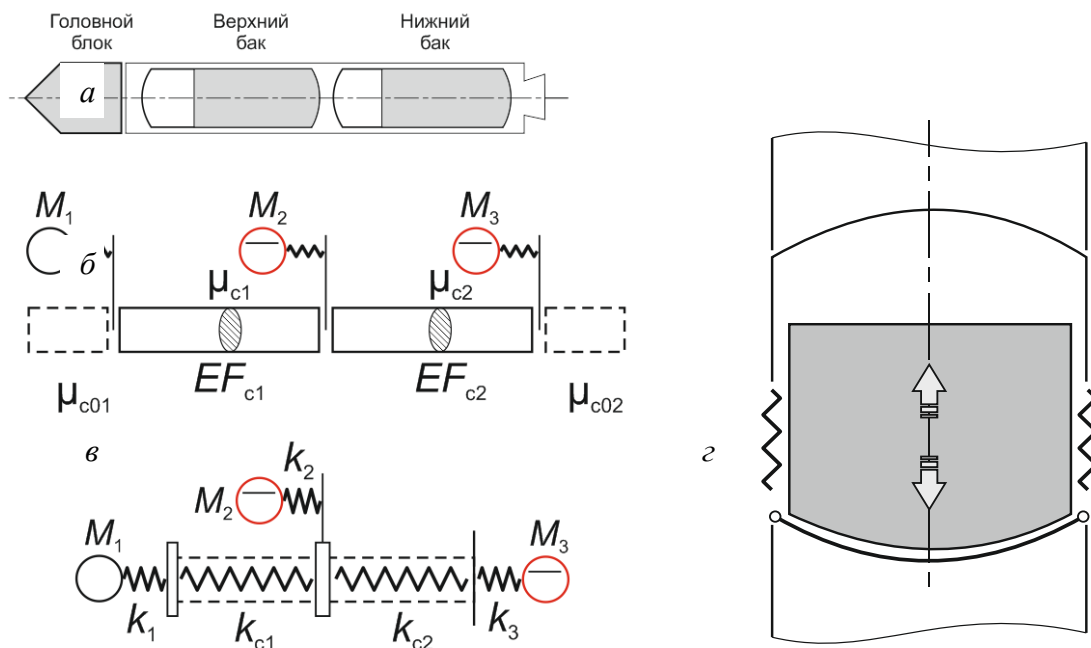


Рис. 2. Схема построения моделей продольных колебаний РКН:

а – компоновочная схема; б – схема стержневой модели;

в – схема модели с сосредоточенными массами;

г – расчетная схема колебаний топлива в баке

Рассмотрим использование моделей, описывающих распределение жесткости и массы по длине ракетных блоков, соединенных последовательно, а также блоков космической головной части. В качестве упруго подвешенных масс в модели РКН имеются в виду: топливо в баках, двигатели, блоки космического аппарата.

Исходные данные для расчета частот и форм продольных колебаний ракеты космического назначения в полете, как функция безразмерного времени $T = t/t_k$, формируются в виде матриц распределения погонной массы и жесткости, массы и жесткости упруго подвешенных масс (УПМ).

Общее решение получено методом начальных параметров [3] при условии варьирования значениями УПМ для окислителя и горючего в соответствующей субракете.

Таким образом, для рассмотренной двухступенчатой ракеты были получены зависимости частот собственных продольных колебаний для первых трех мод, а также графики изменения форм колебаний.

АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ СХЕМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Компоновка космической головной части РКН зависит прежде всего от типа космического аппарата, его целевого назначения. В самом общем виде можно выделить два типа схем (рис. 3):

- однородная схема (воспроизводит отдельный КА без разгонного блока (РБ), установленный через специальный адаптер на блок верхней ступени РН);
- двухмассовая (воспроизводит КА с РБ).

Двухмассовую схему рассмотрим подробнее. В качестве критерия подобия для такой схемы может быть предложена величина относительной массы нижнего блока системы

$$m_{\text{отн2}} = m_2 / (m_1 + m_2).$$

Этот безразмерный коэффициент может рассматриваться в качестве показателя неоднородности массы. Жесткость подвеса сосредоточенных масс имитирует жесткость адаптеров КА и РБ (адаптер космического аппарата (АКА) и адаптер разгонного блока (АРБ)). Принимая допущение о неизменности жесткости подвеса сосредоточенных масс, в рамках первой части исследований изменялись значения масс тел «А» и «В» (для схем на рис. 3, а и б). Данные для двух массовых схем сопоставлялись с результатами для однородной динамической схемы, представленной на рис. 3, в.

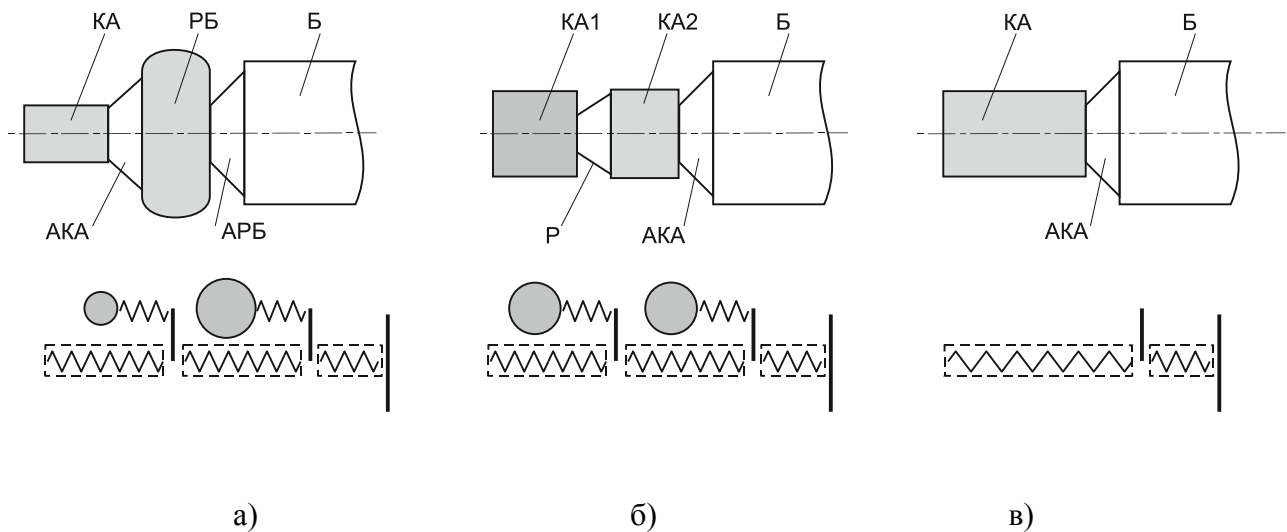


Рис. 3. Динамические схемы полезного груза в составе РКН

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАССЫ КОНСТРУКЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НА СПЕКТРАЛЬНЫЙ СОСТАВ ВИБРАЦИИ РАКЕТЫ

Результаты расчетов частот и форм колебаний корпуса для этапов полета первой и второй субракет условной двухступенчатой РН среднего класса показаны на рис. 4.

Из анализа графиков видно, что для случая, когда масса КА относительно равномерно распределена по его конструкции ($m_{отн2} \approx 0,5$), наблюдается существенное снижение частоты второго тона колебаний на этапе работы первой ступени и первого тона на этапе работы верхней ступени. Последнее свойство может свидетельствовать при прочих равных условиях о некотором снижении запаса динамической устойчивости ракеты-носителя, что может проявиться через рост осевой низкочастотной вибрации корпуса РКН в области размещения КА.

Анализируя результаты моделирования, можно сделать вывод, что даже в условиях неизменности массы полезного груза, перераспределение составляющих этих масс в виде двух масс существенно видоизменяют общую спектральную картину продольной низкочастотной вибрации корпуса РКН.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ЖЕСТКОСТИ КОНСТРУКЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НА СПЕКТРАЛЬНЫЙ СОСТАВ ВИБРАЦИИ РАКЕТЫ

Для оценки влияния жесткости механических связей внутри агрегатов и блоков полезного груза (корпуса космического аппарата и (или) разгонного блока) на параметры продольных колебаний проведены расчеты изменения их спектрального состава по безразмерному времени полета соответствующих субракет.

Для примера была выбрана компоновка типа «космический аппарат – разгонный блок» (рис. 4,а), динамические характеристики которой описываются в параметрах двух масс (A, B) и двух жесткостей (рис. 4,б). При проведении численного эксперимента жесткость стержня, соединяющего данные массы k_{AB} , изменялась в диапазоне от $5 \cdot 10^7$ до $9 \cdot 10^7$ Н/м.

Результаты расчета показаны на рис. 5. На рисунке введены следующие обозначения:

- штрихпунктирными линиями обозначены результаты для большой жесткости;
- сплошными линиями – для пониженной жесткости.

Линии 1, 2 соответствуют данным для второго тона колебаний блока верхней ступени; линии 3, 4 – для первого тона колебаний верхней ступени; линии 5 и 6, соответственно, – для первого и третьего тонов колебаний первой субракеты.

Таким образом, для рассмотренной двухступенчатой ракеты были получены зависимости частот собственных продольных колебаний для первых двух мод, а также графики изменения форм колебаний. Анализ результатов моделирования свидетельствует о значительном влиянии внутриблочных связей в блоках полезного груза на параметры вибрации верхней ступени, при малом влиянии на вибрацию первой ступени.

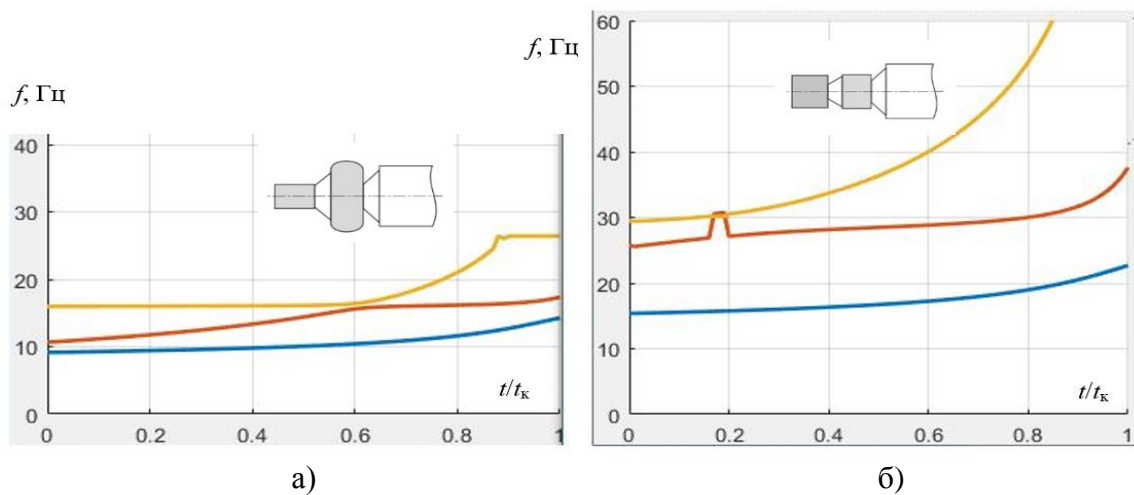


Рис. 4. Изменение частот продольных колебаний по времени полета первой и второй субракет для космической головной части разной компоновки

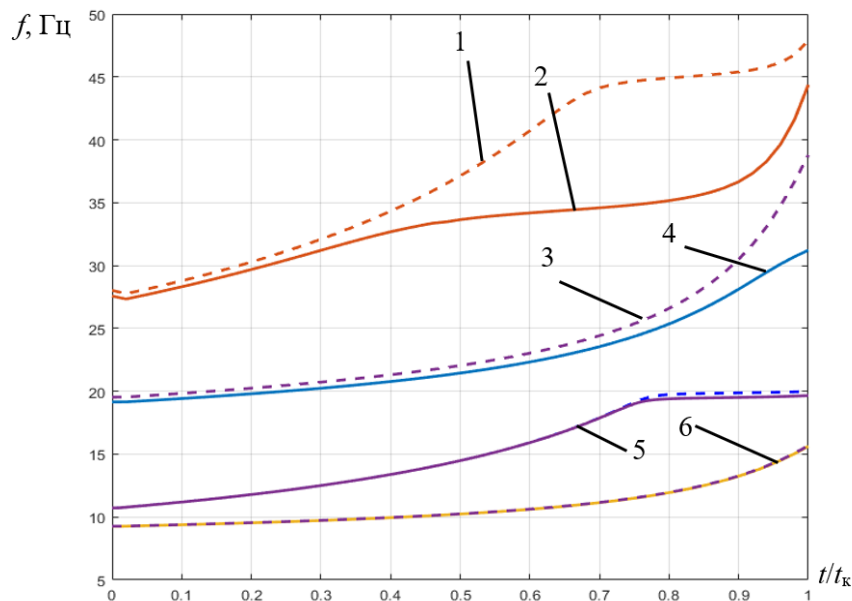


Рис. 5. Изменение частот продольных колебаний по безразмерному времени работы двигательной установки (до полной выработки топлива)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты математического моделирования изменения во времени полета типовой двухступенчатой ракеты-носителя спектрального состава продольных колебаний с различными космическими головными частями показывают наличие существенной взаимосвязи между распределением жесткости, а также масс внутри блоков полезного груза и, с другой стороны, частот рассматриваемых колебаний.

Важной особенностью спектральной картины осевой вибрации РН в полете является то, что частоты колебаний первой субракеты практически не чувствительны к жесткости корпуса космического аппарата, при том, что для второго тона второй субракеты отклонения в частотах достигают 21% и проявляются во второй половине времени работы двигателя.

Список используемых источников

1. Швейко Ю. Ю. Сравнительный анализ частот упругих колебаний конструкций некоторых ракет-носителей по результатам их натурных испытаний и испытаний конструктивно подобных моделей // Космонавтика и ракетостроение. – 2007. – Вып. 2(47). – С. 131–133.
2. Особенности анализа телеметрической информации о перегрузках, получаемой при летной эксплуатации изделий ракетно-космической техники / А. Ю. Бондаренко [и др.] // Космонавтика и ракетостроение. – 2019. – № 4(109). – С. 48–53.
3. Рабинович Б. И. Введение в динамику ракет-носителей космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 1975. – 416 с.
4. Микишев Г. Н., Рабинович Б. И. Динамика тонкостенных конструкций с отсеками, содержащими жидкость. – М.: Машиностроение, 1971. – 559 с.
5. Султанов А. Э., Перфильев А. С., Герасименко С. Ю. Условия возникновения высокоамплитудных низкочастотных колебаний корпуса ракеты-носителя, снижающие надежность агрегатов двигательных установок // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – С. 56–64.
6. Николаев А. Д., Хоряк Н. В. Определение параметров собственных продольных колебаний конструкции корпуса жидкостных ракет-носителей с учетом диссипации энергии // Ракетно-космическая техника и технология. – 2004. – Вып. 4/12. – С. 62–73.
7. Лебедев Е. Л., Перфильев А. С., Султанов А. Э. Анализ параметров вибрационного нагружения корпуса ракет-носителей как фактора повышения интенсивности выработки ресурса сварных соединений топливных баков // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 671. – С. 361–167.
8. Перфильев А. С., Султанов А. Э. Подходы к оцениванию динамических параметров корпуса ракеты-носителя в полете по данным телеметрических измерений // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 673. – С. 212–222.

Л. Е. Богатов;
Е. Л. Лебедев,
доктор технических наук, профессор;
А. О. Репин

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СБОРКИ ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ СИЛОВЫХ ГИРОСКОПОВ

Ресурс шарикоподшипниковых опор силовых гироскопов (СГ, гиродинов) во многом зависит от эффективности методик контроля величины регулировки осевого и радиального зазоров и информативности используемых для этого средств измерений.

В данной статье представлены результаты экспериментального исследования контроля регулировки указанных величин с помощью акустико-эмиссионного (АЭ) метода неразрушающего контроля, имеющего значительные преимущества по сравнению с другими методами контроля.

Ключевые слова: ресурс, силовой гироскоп, осевая нагрузка, шарикоподшипник, технология сборки, акустическая эмиссия, диагностика дефектов подшипников.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время сформировалась концепция по снижению массогабаритных характеристик малых космических аппаратов (МКА), повышению их эффективности, маневренности и срока активного существования (5 лет и более). Решения, принимаемые конструкторскими бюро по улучшению одних показателей, зачастую приводят к ухудшению других. В частности, для снижения аэродинамического сопротивления вращающегося ротора в корпусе гиродин создают вакуум. Однако данная среда негативно сказывается на ресурсе подвижных частей, таких как шарикоподшипники, так как процесс трения в вакууме характеризуется повышенным износом и низкой теплопередачей избыточной теплоты. Кроме того, уменьшение геометрических размеров деталей СГ приводит к снижению эффективности средств измерений геометрических величин, широко применяемых для регулировки подвижных механизмов, так как это создает затруднение для доступа к контролируемым размерам, тем самым существенно снижается информативность и достоверность измерений. На основе опубликованных сведений о методах регулировки зазоров установлено, что применяемые методики и используемое оборудование обладают низкой информативностью и позволяют корректировать величину предварительной осевой нагрузки с точностью 10% [1, 12–14, 16, 17, 19]. Стоит отметить, что точность измерений для механизмов, эксплуатирующихся в вакуумном пространстве, имеет большое значение, потому что допущение ошибок при измерении способствует существенному увеличению износа и снижению ресурса деталей и механизмов.

В результате возникает необходимость разработки принципиально новых методик и применения современного оборудования, способствующих значительному увеличению эффективности проведения измерений для повышения ресурса деталей СГ [1].

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА РЕСУРС ШАРИКОПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ СИЛОВЫХ ГИРОСКОПОВ

Наиболее эффективными исполнительными органами управления движением для малых космических аппаратов являются двухступенные силовые гироскопы (СГ, гиродины) [3, 4].

Данное устройство представляет собой электромеханическое устройство с быстро вращающимся на шарикоподшипниковых опорах ротором (≥ 30000 об/мин).

Согласно статистическим данным, 45–55% отказов вращающихся машин роторного типа, к которым относится СГ, вызваны неисправностями подшипников качения, так как данный элемент конструкции является наиболее нагруженным [1, 2, 18]. Следовательно, шарикоподшипник – это один из важнейших механических узлов гиродинов, ресурс которого существенно влияет на срок активного существования МКА.

В результате анализа факторов, оказывающих влияние на ресурс шарикоподшипников, установлено, что надежность и длительность работы данного узла во многом зависят от величины осевого и радиального зазоров, между шариком и кольцами подшипника [1, 19, 20].

Уменьшение зазоров между парами трения качения приводит к увеличению момента трения подшипников и к быстрому их износу, так как в результате защемления шариков возможен разрыв смазывающей пленки, а в результате одноосного вращения шариков – неравномерный и быстрый износ по кольцу.

Увеличение зазоров сверх оптимальной величины также повышает момент трения и увеличивает износ, вследствие уменьшения числа одновременно работающих шариков и, соответственно, увеличения нагрузки на каждый из них. Кроме того, возможно нарушение соосности деталей и возникновение неопределенности относительного положения деталей в осевом направлении, что создает трудности при динамической балансировке деталей [17–22]. Помимо этого следует учитывать, что во вращающемся радиально упорном шарикоподшипнике, при неправильно отрегулированном зазоре, под воздействием осевой нагрузки возникает гироскопический момент шариков, связанный с изменением направления оси вращения в пространстве. В итоге возникает верчение шариков, сопровождаемое повышенным изнашиванием поверхностей качения [15]. Для ликвидации верчения шариков подшипник нагружают предварительной осевой нагрузкой с помощью подбора прокладок различной толщины, между подшипником и его крышкой, тем самым смещая кольца подшипника и добиваясь оптимального значения осевого и радиального зазоров.

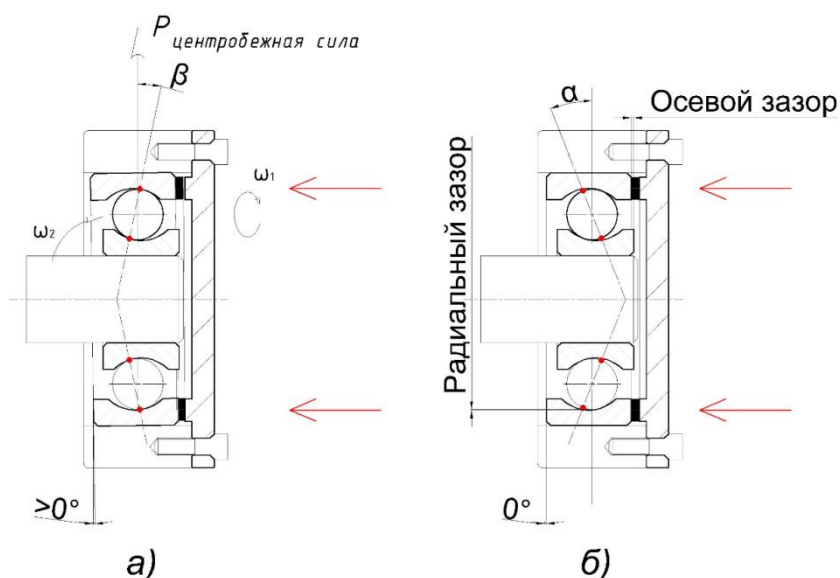


Рис. 1. Установка шарикоподшипника в посадочном отверстии:
а – с перекосом; б – без перекоса

Крепление крышки подшипника к корпусу СГ осуществляется с помощью болтовых соединений. Однако затяжка болтовых соединений крышки ограничивается пределом упруго-

сти материала, из которого они изготовлены, что, в свою очередь, не всегда способствует равномерному распределению контактных напряжений на поверхности колец шарикоподшипника, если подшипник установлен в посадочное отверстие с перекосом. В связи с этим явление верчения шариков устраняется не на всей поверхности наружного кольца подшипника с помощью приложения предварительной осевой нагрузки (см. рис. 1).

Стоит отметить, что для изделий, эксплуатирующихся в космосе, регулировка зазоров особенно важна, так как данная процедура производится единожды – при сборке, и ошибки, допущенные в этом случае, исправить во время эксплуатации невозможно.

Контактное взаимодействие шарика с другими деталями подшипника сопровождается рядом ударов. Результатом удара шарика о другие детали подшипника будут упругие деформации этих деталей, вследствие чего в материале корпуса СГ будут распространяться акустические волны. В связи с этим одним из способов изучения динамического взаимодействия деталей подшипника, позволяющим наиболее чувствительно реагировать на изменение контактных напряжений, является метод акустической эмиссии (АЭ).

Первоначально такой метод широко применялся для неразрушающего контроля статических конструкций, однако с годами его применение распространилось и на контроль работоспособности машин (механизмов), в устройстве которых используются подшипники. Данный метод рассматривается как альтернативный вибрационному методу, но имеющий преимущество, которое заключается в более раннем обнаружении дефектов подшипников. Успешность его применения для обнаружения дефектов подшипников ограничена сложностью обработки, распознавания и классификации полученных данных.

Исходя из исследований, посвященных применению метода (АЭ) для диагностики динамических объектов, можно сделать вывод, что данный метод обладает высокой информативностью и способен достоверно отображать изменения кинематики процессов, происходящих в подшипнике [5–10, 13].

Для определения возможности использования метода АЭ для контроля неравномерности распределения предварительной осевой нагрузки, возникающей в результате перекосов подшипника, был проведен эксперимент, в рамках которого предполагалось оценить кинематику движения шарика подшипника по изменению амплитудно-частотных значений АЭ сигналов, генерируемых ударами шарика о другие его детали.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СБОРКИ ШАРИКОПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ

Эксперимент проводился на лабораторной установке ТММ 35-М, предназначенной для изучения уравнивания вращающегося ротора по заданным неуравновешенным массам. Регулировка предварительной осевой нагрузки осуществлялась с помощью затяжки крышки подшипника тремя болтами М4 х 0,7 с классом прочности 8,8. Контроль величины момента затяжки болтовых соединений производился динамометрическим ключом *Garwin industrial 502210-1-5S*, с диапазоном измерений от 1 до 5 Нм. Изменение АЭ сигналов осуществлялось пьезоэлектрическими преобразователями ДР 15И (ПАЭ) акустико-эмиссионной системы «Малахит АС-12А».

При проведении эксперимента ПАЭ закрепили на расстоянии 20 мм друг от друга и посадочного отверстия шарикоподшипника (рис. 2). После этого с помощью динамометрического ключа производили затяжку болтовых соединений крышки крепления подшипника с различными моментами затяжки, в диапазоне от $\min M_{кр} = 0.27$ кгс·м до $\max M_{кр} = 0.33$ кгс·м. Далее, посредством фрикционной передачи движения от двигателя ротор раскручивали до 1500 об/мин, после чего для исключения интерференции акустических сигналов от вращающегося двигателя производили отвод рабочего колеса двигателя, и после полной его оста-

новки производилась регистрация АЭ сигналов от шарикоподшипника при различных моментах затяжки болтовых соединений его крышки [18].

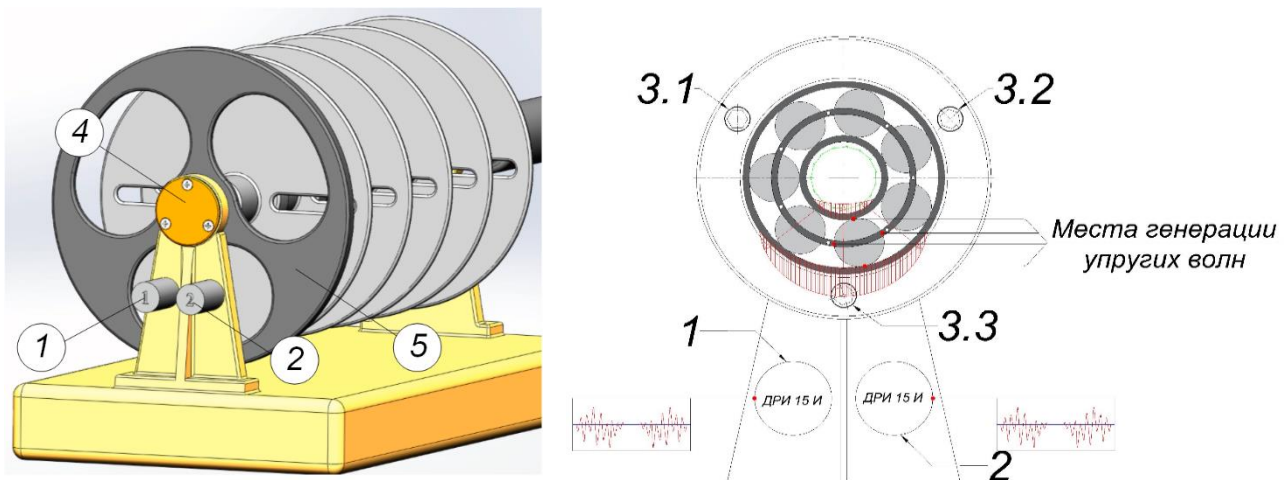


Рис. 2. Экспериментальная установка по определению изменения АЭ сигналов при изменении осевой нагрузки, действующей на подшипник:
1 – преобразователь ДР 15 и АЭ № 1; 2 – преобразователь ДР 15 и АЭ № 2;
3 – болтовое соединение; 4 – крышка шарикоподшипника;
5 – рабочее колесо

В результате проведенного эксперимента были получены зависимости изменения амплитудно-частотных характеристик АЭ сигналов от времени и длительности импульсов для различных моментов затяжки болтовых соединений крышки шарикоподшипника.

Для уменьшения влияния посторонних шумов на показания измеряемых параметров на каждом из измеряемых каналов было выставлено пороговое значение в 20 Дб. Выбор данного порогового значения обуславливается тем, что согласно данным основные дефекты, влияющие на ресурс подшипника, проявляются при глубине модуляции порядка 20 Дб [20].

Из анализа полученных данных установлено, что при затяжки болтовых соединений с моментом $\min M_{кр} = 0.27$ кгс·м на ПАЭ регистрируются сигналы с различной частотой (рис. 3).

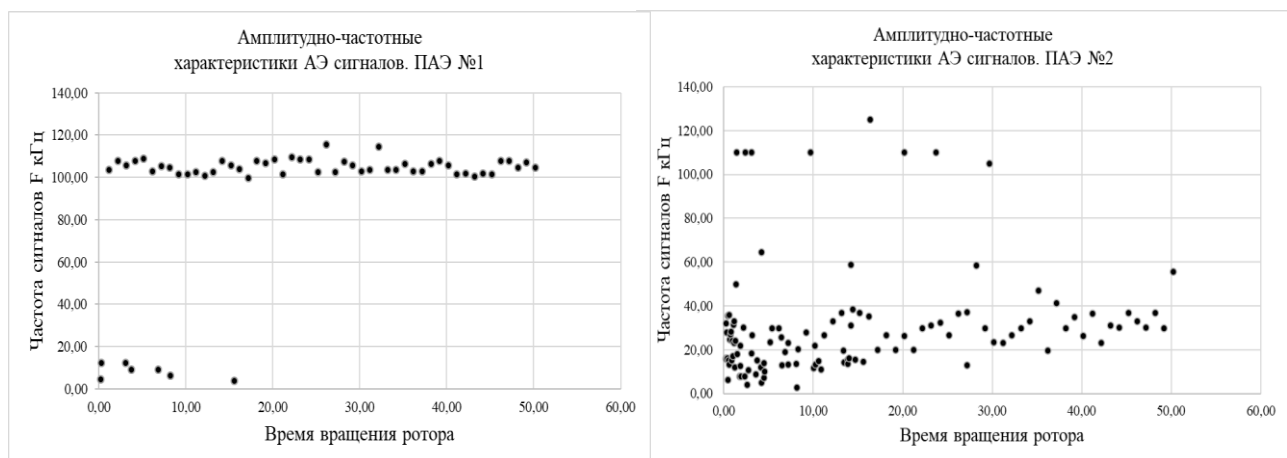


Рис. 3. Регистрация АЭ сигналов при $M_{кр} = 0.27$ кгс·м

Увеличение момента затяжки болтовых соединений до максимального значения $\max M_{кр} = 0.33$ кгс·м приводит к разделению АЭ сигналов на две группы: низкочастотные –

до 50 кГц и высокочастотные – от 100 до 120 кГц (рис. 3). Данное разделение сигналов характерно для случая, когда подшипник установлен в посадочном отверстии с перекосом (см. рис. 1,а). Нагрузка, создаваемая за счет прижатия крышки подшипника к поверхности его наружного кольца, распределяется неравномерно, вследствие чего в области плотного прилегания крышки верчение шариков устраняется, тем самым шарик вращается в режиме трения качения в постоянном контакте с наружным и внутренним кольцами. В случае слабого поджатия крышки, помимо трения качения, на шарик действует трение верчения, и за счет слабого прилегания шарика к наружному и внутреннему кольцам частота ударов его о сопряженные поверхности снижается.

В дальнейшем проводились изменения моментов затяжки болтовых соединений индивидуально для каждого из трех болтов, в диапазоне от 0.27 кгс·м до 0.33 кгс·м. В результате было установлено, что при достижении момента затяжки 0.27 кгс·м для болтов № 1 и № 3 и 0.33 кгс·м для болта № 2 исчезают низкочастотные сигналы и происходит выравнивание значений сигналов на двух ПАЭ.

Стоит отметить, что при различных значениях момента затяжки болтовых соединений крышки шарикоподшипника температура корпуса, в котором установлен подшипник, от момента остановки электродвигателя до полной остановки ротора практически не изменялась, а время вращения ротора в случае, указанном на рис. 4, увеличилось на 20 с.

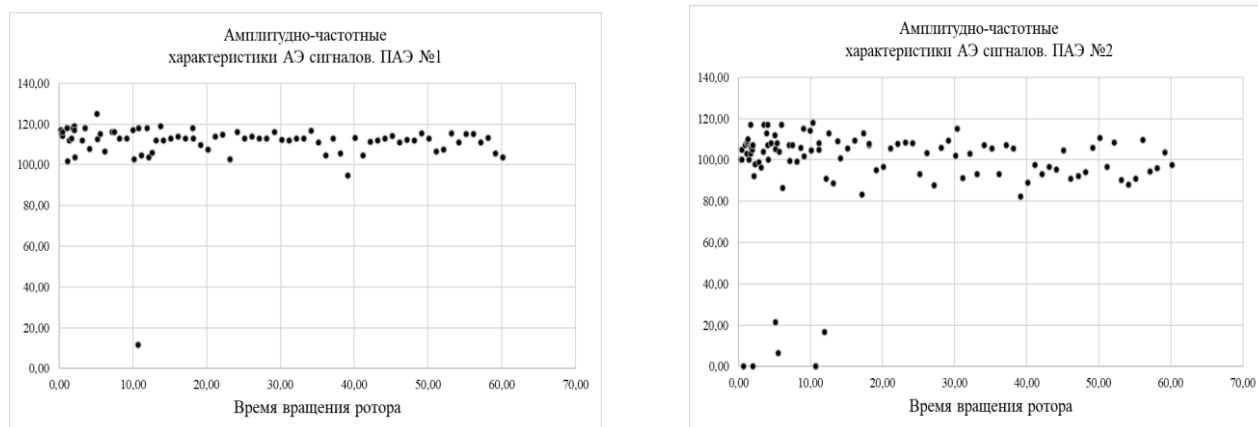


Рис. 4. Регистрация АЭ сигналов с моментами затяжки:
для болтовых соединений № 1 и № 3 $M_{кр} = 0.27$ кгс·м,
№ 2 – $M_{кр} = 0.33$ кгс·м

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного эксперимента установлено следующее:

- акустико-эмиссионный метод неразрушающего контроля возможно использовать для регулировки зазоров шарикоподшипников;
- указанный метод обладает высокой чувствительностью и способен реагировать на незначительные отклонения нагрузок, действующих на подшипник;
- использование метода АЭ контроля позволяет оценивать качество установки подшипников;
- проведение измерений методом АЭ не зависит от геометрических размеров деталей.

Однако достоверность прогнозирования ресурса шарикоподшипниковых узлов по заданным параметрам предварительной осевой нагрузки, оцениваемых АЭ сигналами, требует

проведения дополнительных экспериментов, с более длительным временем наработки подшипникового узла, до появления явно выраженных дефектов.

Список используемых источников

1. Хруцкая М. В., Камалдинов А. М. К вопросу увеличения ресурса силовых гироскопов и двигателей-маховиков // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2013. – Вып. № 4(42). – С. 271–278.
2. Кузнецов М. М. Монтаж ответственных узлов гироскопических приборов // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2009. – № 1(5). – С. 132–135.
3. Платонов В. Н., Сумароков А. В. Обеспечение точностных характеристик стабилизации перспективного космического аппарата для дистанционного зондирования Земли // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2018. – № 4. – С. 177–188.
4. Яковец О. Б., Акашев Д. И. Перспективный силовой гироскопический комплекс для высокоманевренных космических аппаратов // Ракетно-космическая техника. – 2013. – Т. 1, № 1(2). – С. 16.
5. Маленко П. И. Исследование методом акустической эмиссии поверхностей трения в условиях смазывания // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2011. – Т. 13, № 2. – С. 164–171.
6. Деформация и разрушение материалов / М. М. Криштал [и др.] // Тяжелое машиностроение. – 2007. – № 12. – С. 14–18.
7. Шемякин В. В. Применение метода акустической эмиссии для диагностики промышленного оборудования // Экспозиция. Нефть. Газ. – Набережные Челны, 2008. – № 2. – С. 62–64.
8. Study of fault in outer race of Roller Bearings using Acoustic emission and Vibration analysis / V. Vital Rao [et al.] // International Journal of Engineering Science Invention. – 2020. – P. 62–66.
9. Hort F., Mazal P., Vlastic F. Monitoring of Acoustic Emission Signal of Loaded Axial Bearings // Journal of Materials Science and Engineering. – 2011. – P. 717–724.
10. Morhain A., Mba D. Bearing defect diagnosis and acoustic // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J, Journal of Engineering Tribology. – 2003. – Vol. 217, № 4. – P. 275–272.
11. Мазнев А. С., Фёдоров Д. В. Тенденции развития систем акустико-эмиссионной диагностики подшипниковых узлов локомотивов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2007. – № 1(10). – С. 69–78.
12. Батищева О. М., Папшев В. А., Родимов Г. А. Технологическое обеспечение надежности и качества сборки машин // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». – 2015. – Т. 1. – С. 28–29.
13. Родимов Г. А., Батищева О. М., Папшев В. А. Повышение качества сборки агрегатов машин на подшипниках качения // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2015. – Т. 17, № 2–4. – С. 886–890.
14. Котурга В. П., Бородин Д. А., Смылова И. В. Модель формирования зазоров и производных характеристик в шариковых радиальных подшипниках // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2010. – № 1(77). – С. 76–80.
15. Иванов М. Н., Финагенов В. А. Детали машин: учебник / Министерство образования Российской Федерации. – М.: Высш. шк., 2005. – 408 с.
16. ГОСТ 24810-2013. Подшипники качения. Внутренние зазоры: введ. 2015-01-01 (взамен ГОСТ 24810-81). – М.: Стандартинформ, 2013. – 18 с.

17. ГОСТ 58866-2020. Методы контроля геометрических параметров деталей подшипников [Methods for controlling geometrical parameters of bearing parts]: национальный стандарт РФ [утв. и введ. в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 28 мая 2020 г. № 234 ст., введ. (впервые) 2020.05.28]. – М.: Стандартинформ, 2020. – 37 с.

18. РД 37.001.131-89. Затяжка резьбовых соединений, нормы затяжки и технические требования [Tightening of threaded connections tightening standards and technical requirements]: национальный стандарт РФ [утв. и введ. в действие начальником научно-технического отдела Минавтосельхозмаша 12 декабря 1989 г. Конструкторско-технологическим институтом холодновысадочного и пружинного производства]. – 1989. – 23 с.

19. Монтаж подшипниковых опор / А. А. Федулов [и др.]; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Уральский федеральный университет. – Екатеринбург, 2019. – 44 с.

20. Источники колебаний в подшипнике // Все о транспорте газа: [сайт]. – URL: <https://www.turbunist.ru/34263-istochniki-vibracii-pri-rabote-v-podshipnike.html> (дата обращения: 19.05.2021).

21. А. с. № 1735731 А1 СССР, МПК G01M 13/04. Машина для ресурсных испытаний подшипников качения / В. А. Пилипчик; заявитель Институт проблем надежности и долговечности машин АН БССР. – № 4827759: заявл. 21.05.1990: опубл. 23.05.1992.

22. А. с. № 905690 А1 СССР, МПК G01M 13/04. Способ контроля качества сборки подшипников качения / П. Б. Бамбалас, К. М. Рагульскис, М. С. Рондоманкас, В. И. Чуприн; заявитель Каунасский политехнический институт имени Антанаса Снечкуса. – № 2917864: заявл. 05.05.1980: опубл. 15.02.1982.

К. Б. Болдырев,
кандидат технических наук, доцент;
А. Ю. Карчин

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭНЕРГОМАССОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ СО СПАСАЕМОЙ ПЕРВОЙ СТУПЕНЬЮ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ ПЕРЕЛИВА РАКЕТНОГО ТОПЛИВА

В статье представлены результаты исследования зависимости энергомассовых характеристик от параметров системы перелива компонентов ракетного топлива между баками в ракетах-носителях тяжелого класса со спасаемыми ракетными блоками первой ступени, использующих параллельную схему компоновки.

Ключевые слова: ракета-носитель, ракетодинамическая система спасения, полезный груз, перелив ракетного топлива.

ВВЕДЕНИЕ

Современный этап развития средств выведения космических аппаратов характеризуется совершенствованием энергомассовых характеристик ракет-носителей. Активно развивается направление создания спасаемых ракетных блоков первой ступени. Разработаны десятки способов возвращения первых ступеней, но наиболее оптимальными представляются три из них. Это парашютный способ, в котором ракетный блок спасается системой тормозных и планирующих парашютов с последующим перехватом вертолетом. Способ аэродинамической (авиационной) посадки с использованием самолетного крыла и турбореактивного вспомогательного двигателя посадки на каждом ракетном блоке. Третий способ уже реализован на практике – ракетодинамическая посадка с использованием маршевой двигательной установки для торможения на доатмосферном и атмосферном участках и реализации приземления. Указанный способ требует использования полного запаса топлива в ракетных блоках первой ступени и реализации глубокого дросселирования тяги маршевой двигательной установки. Как показала практика, эффективным является использование нескольких маршевых жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) на спасаемой ступени. В этих условиях оптимальным представляется использование конструктивно-компоновочной схемы ракеты-носителя (РН) с параллельным расположением ракетных блоков первой и второй ступеней, при этом актуальной становится задача повышения весовой эффективности конструкции ракетных блоков для формирования запаса топлива, затрачиваемого на спасение. В этих условиях нам представляется целесообразным реализация схемы подачи компонентов топлива с перераспределением части топлива из баков одной ступени в другую и обеспечением более полной заправки к моменту отделения предшествующей ступени.

ЭНЕРГОМАССОВАЯ МОДЕЛЬ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ С СИСТЕМОЙ ПЕРЕЛИВА КОМПОНЕНТОВ РАКЕТНОГО ТОПЛИВА МЕЖДУ СТУПЕНЯМИ

Одним из возможных путей улучшения энергетических характеристик РН тяжелых классов (массы полезного груза, выводимого на опорную орбиту) является повышение весовой эффективности конструкции второй ступени за счет перераспределения части топлива из баков первой ступени и обеспечения ее полной заправки к моменту отделения боковых блоков.

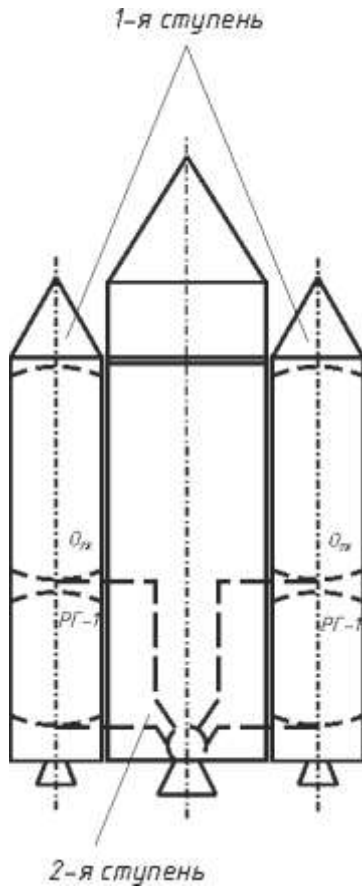


Рис. 1. Схема ракеты-носителя с переливом ракетного топлива

Принцип использования параллельной схемы соединения ракетных блоков в ракете космического назначения предложил еще К. Э. Циолковский в 1934 году. Развивая тему совершенствования средств выведения, он указывал на теоретическую возможность переливания топлива с целью снижения пассивной массы, которую составляет конструкция топливных баков для хранения запасов топлива, расходуемых при совместной работе первой и второй ступеней. Система перелива подразумевает выделение дополнительного объема в топливных баках первой ступени для хранения топлива, подаваемого в двигателя второй ступени на этапе их совместной работы. После окончания работы первой ступени и ее отделения от второй субракеты питание двигателей происходит из топливных баков второй ступени (рис. 1). Указанную идею в качестве возможной к реализации рекомендовал конструктор М. К. Тихонравов, а также ее предлагалось использовать в ракете-носителе сверхтяжелого класса УР-700. Перспективность применения схемы перелива рассматривается для использования на ракете-носителе *Falcon Heavy* американской компании *SpaceX*.

Определение оптимального распределения масс топлива между ступенями ракеты-носителя возможно провести, используя энергомассовую модель, включающую в себя уравнения движения центра масс ракеты и уравнения ее углового положения.

Рассматриваемая РН является двухступенчатой с параллельной схемой расположения ракетных блоков первой и второй ступеней, компоненты топлива – жидкий кислород и керосин, целевая орбита – круговая с высотой 200 км, конечная скорость второй ступени равна первой космической скорости.

В качестве граничных рассмотрены следующие условия:

$$\left. \begin{aligned} V_K &= V_{кр}(H_K) \\ H &= H_K \\ \vartheta_K &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где V_K, H_K – значения конечной скорости и высоты движения РН;
 $V_{кр}(H)$ – значение круговой скорости для заданной высоты орбиты;
 ϑ_K – значение конечного угла тангажа РН.

На активном участке полета происходит управляемое движение ракеты-космического назначения под воздействием системы сил. Управление движением осуществляется по трем плоскостям стабилизации. Программное движение центра масс на атмосферном участке осуществляется под действием составляющих аэродинамической силы и тяги, которые возникают благодаря повороту корпуса РКН относительно центра масс под действием исполнительных органов управления движением. Величина теоретической конечной скорости, рассчитанной по уравнению Циолковского для многоступенчатой ракеты [3], снижается по причине энергетических потерь на преодоление гравитационной силы, на аэродинамическое

трение в плотных слоях атмосферы и потерь на создание управляющих сил. С целью минимизации указанных потерь программу движения РН разбивают на два участка:

– вертикальный участок, на котором программа движения имеет вид

$$\vartheta_k(\tau) = \frac{\pi}{2}, \tau \in (0 \div 0,05); \quad (2)$$

– участок разворота, на котором программа задается в виде полинома

$$\vartheta(t) = \frac{\pi}{2} \left(\frac{1-\tau}{0,95} \right)^k, \tau \in (0,05 \div 1), \quad (3)$$

где τ – относительное время движения РН, $\tau = \frac{t}{t_k}$;

k – показатель степени полинома.

Показатель степени k в полиноме (3) определяет вариант программы движения РКН и проектное распределение масс топлива между ступенями, при котором потери будут минимизированы. При определении оптимального показателя k будем решать поставленную задачу применительно к двухступенчатой РН. Выражения для V_K и H_K такой ракеты имеют вид:

$$V_K = -\sum_{i=1}^{i=2} K_{0i} I_{yni} \ln(1 - \bar{m}_{Ti}) - \left(\frac{I_{y1} \bar{m}_{T1}}{\Phi_{01}} + \frac{I_{yn2} \bar{m}_{T2}}{\Phi_{02}} \right) \int_0^1 \sin \theta d\tau; \quad (4)$$

$$H_K = \left(\frac{I_{y1} \bar{m}_{T1}}{g\Phi_{01}} + \frac{I_{yn2} \bar{m}_{T2}}{g\Phi_{02}} \right) \int_0^1 V(\tau) \sin \theta d\tau, \quad (5)$$

где K_{0i} – коэффициент потерь;

θ – угол наклона вектора скорости в связанной системе координат;

Φ_{01}, Φ_{02} – значения тяговооруженности первой и второй субракет.

В массив проектных данных входят параметры ракеты ($K_{0i}, \Phi_{0i}, I_{yi}$ и др.). Основным параметром, учитывающим перелив компонентов топлива между ступенями, является коэффициент соотношения между относительными запасами топлива второй и первой ступеней:

$$\chi = \frac{\bar{m}_{T2}}{\bar{m}_{T1}}.$$

С учетом перелива $\chi = 1,1 \div 1,2$. В состав уравнений (4) и (5) входит выражение

$J_g = \int_0^{\tau} \sin \theta d\tau$, которое представляет собой интеграл гравитационных потерь, являющийся

функцией от показателя k (рис. 2). С учетом интеграла потерь определим зависимость (рис. 2) конечной скорости V_K от относительного запаса топлива во второй субракете по уравнению (4). Относительную массу топлива принимаем равной $\bar{m}_{T2} = 0,5 \div 0,9$.

Функция, представленная на рис. 3, позволяет определить зависимость относительной массы топлива на второй субракете от полинома k в соответствии с требуемой величиной конечной скорости для искомой высоты орбиты. По соотношению $\chi = \frac{\bar{m}_{T2}}{\bar{m}_{T1}}$ определяется относительный запас топлива первой ступени.

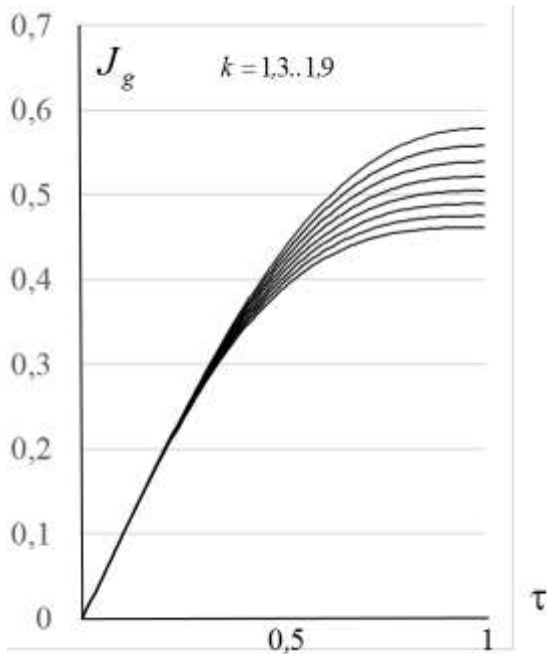


Рис. 2. Зависимость интеграла потерь скорости от времени полета и показателя степени полинома k

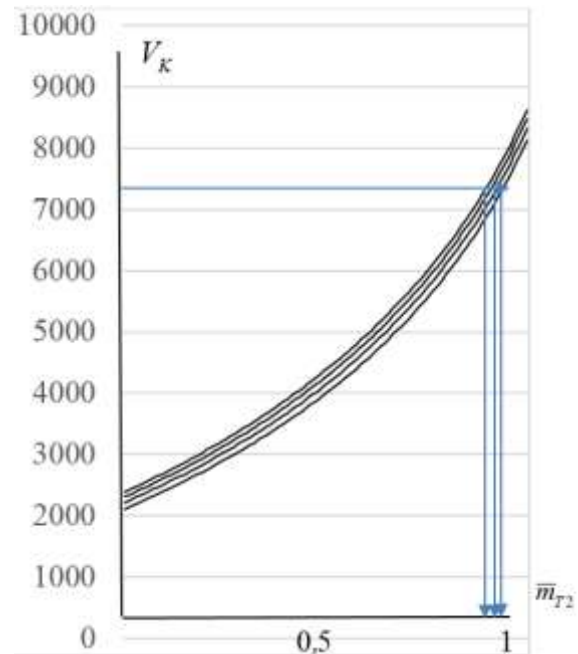


Рис. 3. Зависимость конечной скорости от относительных запасов топлива и показателя степени полинома k

Для определения зависимости текущей скорости полета от относительного времени $V(\tau)$ вводится переменная $\tau_1 = \frac{t}{t_1 + t_2}$ – относительное время работы двигателей первой ступени. С учетом полученных выше соотношений

$$\tau_1 = \frac{1}{1 + \frac{\bar{m}_{T2} I_{yn2} \Phi_{01}}{\bar{m}_{T1} I_{yn1} \Phi_{02}}}. \quad (6)$$

Зависимость $V(\tau)$ для интервала времени $0 \leq \tau \leq \tau_1$ имеет форму

$$V(\tau) = -K_{01} I_{yn1} \ln \left(1 - \bar{m}_{T1} \frac{\tau}{\tau_1} \right) - \left(\frac{I_{y1} \bar{m}_{T1}}{\Phi_{01}} + \frac{I_{yn2} \bar{m}_{T2}}{\Phi_{02}} \right) \int_0^{\tau} \sin \theta d\tau, \quad (7)$$

а для интервала времени $\tau_1 \leq \tau \leq 1$ текущее значение скорости

$$V(\tau) = V(\tau_1) - K_{02} I_{yn2} \ln \left(1 - \bar{m}_{T2} \frac{\tau - \tau_1}{1 - \tau_1} \right) - \left(\frac{I_{y1} \bar{m}_{T1}}{\Phi_{01}} + \frac{I_{yn2} \bar{m}_{T2}}{\Phi_{02}} \right) \int_{\tau_1}^{\tau} \sin \theta d\tau. \quad (8)$$

Зависимость текущей скорости $V(\tau, K)$ представлена на рис. 4.

Определив функцию, представленную на рис. 4, получим зависимость $H = f(k)$ (рис. 5), используя которую совместно с $\bar{m}_{T2} = f(k)$ вычислим искомое значение показателя степени полинома $k_{иск}$, описывающее оптимальную программу движения РН с системой перелива компонентов ракетного топлива и требуемое распределение топлива между ступенями.

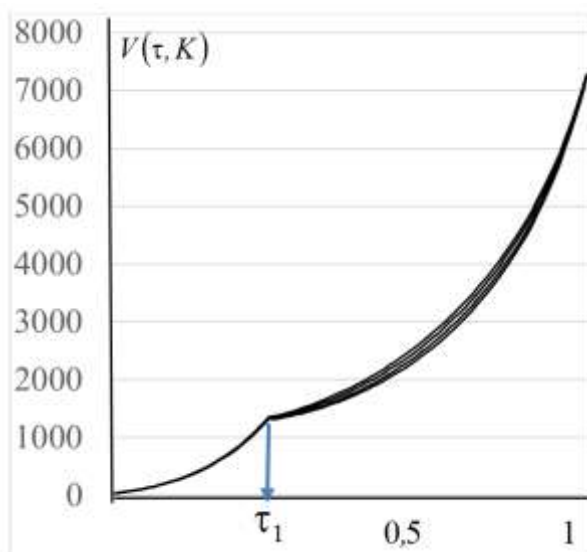


Рис. 4. Изменение скорости полета ракеты по времени для различных программ движения

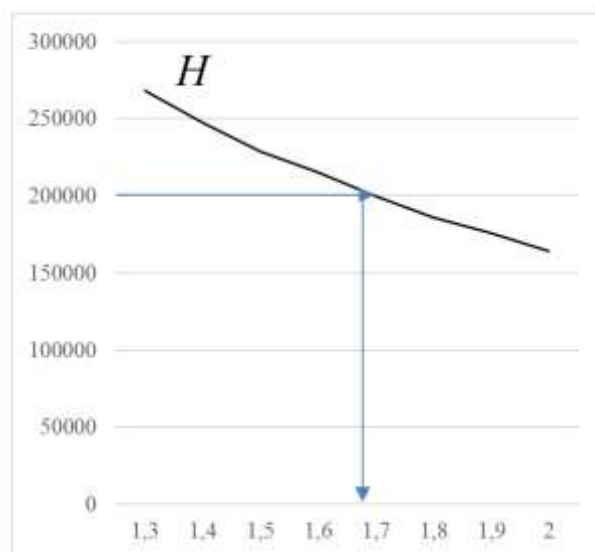


Рис. 5. Выбор момента расстыковки ступеней

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных исследований разработан алгоритм энергомассового анализа двухступенчатой ракеты-носителя, использующей систему перелива ракетного топлива между ступенями. Проведены расчеты оптимального показателя программы выведения с учетом перераспределения масс топлива между ступенями и формирования запаса топлива для реализации ракетодинамического способа спасения ракетных блоков первой ступени.

Проведенные расчеты показали, что целесообразность использования ракетодинамической системы спасения совместно с системой перелива ракетного топлива между ступенями возможно при значениях показателя степени полинома, определяющего закон изменения угла тангажа в диапазоне $k_{иск} = 1,68 \div 1,72$.

При проведении дальнейших исследований полученные результаты возможно использовать в уравнениях массовой модели проектируемых РН для определения эффективности применения системы перелива компонентов ракетного топлива на РН различного класса по массе полезного груза, выводимого на опорную орбиту.

Список используемых источников

1. Проблемные вопросы использования трасс запусков космических аппаратов и районов падения отделяющихся частей ракет космического назначения: моногр. / В. В. Авдошкин [и др.]; под ред. А. С. Фадеева, Н. В. Аверкиева. – СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2016. – 372 с.
2. Шилимов В. Ф., Плясунов А. А. Проектирование ракет: учеб. пособие. – Л.: ВИКИ им. А. Ф. Можайского, 1982. – Вып. 1: Энергомассовый анализ ракет. – 62 с.
3. Ракеты-носители: учебник / К. Б. Болдырев [и др.]. – СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2018. – 385 с.

В. А. Власов,
кандидат технических наук, доцент;
В. И. Горбулин,
доктор технических наук, профессор;
Н. В. Радионов,
доктор экономических наук, профессор,
кандидат технических наук

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОРБИТЫ КОСМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА В ЦЕНТРАЛЬНОМ ГРАВИТАЦИОННОМ ПОЛЕ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ ТРЕХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ НА НЕГО ИЗ ПОДВИЖНОЙ ТОЧКИ НАБЛЮДЕНИЯ (ЗАДАЧА КОСМИЧЕСКОЙ НАВИГАЦИИ – ЗАДАЧА ГАУССА)

Рассмотрен один из методов небесной механики в задаче двух тел. В рамках задачи вычисления орбит космических объектов по трем наблюдениям (задача космической навигации – задача Гаусса) получен новый результат для случая круговых и околокруговых орбит в чисто алгебраической форме.

Ключевые слова: задача Гаусса, поиск начального приближения, аналитическое решение, вычисления орбит космических объектов, круговые и околокруговые орбиты.

ВВЕДЕНИЕ

В космической навигации важное значение имеет задача, связанная с определением наблюдателем орбиты другого космического объекта, движущегося в том же гравитационном поле, направление на который (и только направление) наблюдатель может измерить с любой наперед заданной точностью. Пусть наблюдатель в любой момент времени точно знает свое местоположение в инерциальном пространстве в некоторой заданной системе координат с центром в центре гравитационного притяжения. В классической литературе по астрономии [2] данную задачу принято называть задачей Гаусса – по имени известного математика и астронома Карла Фридриха Гаусса, впервые поставившего такую задачу и получившего один из вариантов численного ее решения в ходе исследования полета в Солнечной системе первых четырех малых планет – Цереры, Паллады, Юноны и Весты. Примененный Гауссом метод вначале позволил вновь найти на небе планету Цереру после того, как она была утеряна вскоре после ее открытия астрономом Дж. Пиацци в 1801 г. Свою окончательную форму метод Гаусса поэтапно принял после дальнейшей многолетней апробации, в результате которой в 1809 г. и появился знаменитый труд «Теория движения небесных тел, обращающихся вокруг Солнца по коническим сечениям». В данной статье рассматривается конструктивный подход к получению численно-аналитического решения задачи Гаусса в несколько измененной, по сравнению с принятой в астрономии, постановке.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Не снижая общности постановки задачи Гаусса, можно положить, что наблюдатель движется по орбите в центральном гравитационном поле силы притяжения Земли. Предполагается, что наблюдатель (H) точно знает в любой момент времени радиус-вектор \bar{R}_H своего местоположения в абсолютной геоцентрической экваториальной системе координат (АГЭСК). Кроме того, в тот же самый момент времени наблюдатель может измерить в

АГЭСКО орт \bar{R}_{HK}^0 направления на некоторый исследуемый космический объект (K), также движущийся в гравитационном поле Земли по кеплеровской траектории (кривой второго порядка).

Пусть наблюдатель в три последовательных момента времени с помощью автономной измерительной системы получает три пары векторов:

$$(\bar{R}_{Hi}, \bar{R}_{HKi}^0), \quad i = 1, 2, 3, \quad (1)$$

где i – номера последовательных моментов времени t_1, t_2, t_3 .

В этих условиях задача Гаусса сводится к необходимости расчета по данным (1) кеплеровских элементов орбиты объекта K : большой полуоси a , эксцентриситета e , наклона i , прямого восхождения восходящего узла Ω , аргумента широты перигея ω , а также либо истинной аномалии ϑ в любой из трех заданных моментов времени измерений t_1, t_2, t_3 , либо времени τ прохождения перигея орбиты (когда $\vartheta = 0$).

Решение поставленной задачи разбивается на два этапа.

На *первом* (и наиболее важном) *этапе* решается вспомогательная задача определения радиусов-векторов \bar{R}_{Ki} , $i = 1, 2, 3$ положений в АГЭСКО объекта K в моменты времени измерения.

На *втором этапе* решается собственно задача определения кеплеровских элементов орбиты по трем найденным радиусам-векторам. Отметим, что методика решения задачи второго этапа хорошо известна в литературе (например, в [3]), далее в статье будет рассмотрена только задача первого этапа.

Учитывая, что движение объекта K происходит в центральном гравитационном поле, несложно заметить, что все три вектора \bar{R}_{Ki} , $i = 1, 2, 3$ лежат в одной плоскости (плоскости орбиты объекта K). Поэтому можно записать векторное уравнение:

$$(\bar{R}_{K1} \times \bar{R}_{K2}) = a \cdot (\bar{R}_{K1} \times \bar{R}_{K3}) = b \cdot (\bar{R}_{K2} \times \bar{R}_{K3}). \quad (2)$$

Смысл уравнения (2) заключается в том, что каждое векторное произведение определяет одно и то же направление нормали к плоскости орбиты объекта K . Следовательно, векторные произведения только по длине результирующих векторов отличаются в a или b раз.

Векторы \bar{R}_{Ki} , $i = 1, 2, 3$ в выражении (2) очевидно можно вычислить по правилам векторного сложения:

$$\bar{R}_{Ki} = \bar{R}_{Hi} + D_i \cdot \bar{R}_{HKi}^0; \quad (3)$$

$$\bar{R}_{Ki} = [X_{Hi} + D_i \cdot X_{HKi}^0, Y_{Hi} + D_i \cdot Y_{HKi}^0, Z_{Hi} + D_i \cdot Z_{HKi}^0]^T, \quad i = 1, 2, 3, \quad (4)$$

где D_i – неизвестные дальности – модули векторов \bar{R}_{HKi} визирования наблюдателем объекта;

X_{Hi}, Y_{Hi}, Z_{Hi} ;

$X_{HKi}^0, Y_{HKi}^0, Z_{HKi}^0$ – известные координаты соответствующих векторов в АГЭСКО,
 $i = 1, 2, 3, (X_{HKi}^0)^2 + (Y_{HKi}^0)^2 + (Z_{HKi}^0)^2 = 1$.

Графическое пояснение к формуле (3) показано на рис. 1.

Таким образом, на первом этапе должна быть решена задача поиска трех дальностей D_i , $i = 1, 2, 3$, которые удовлетворяют, по крайней мере, уравнению (2) упорядоченной по времени компланарности трех радиусов-векторов (4).

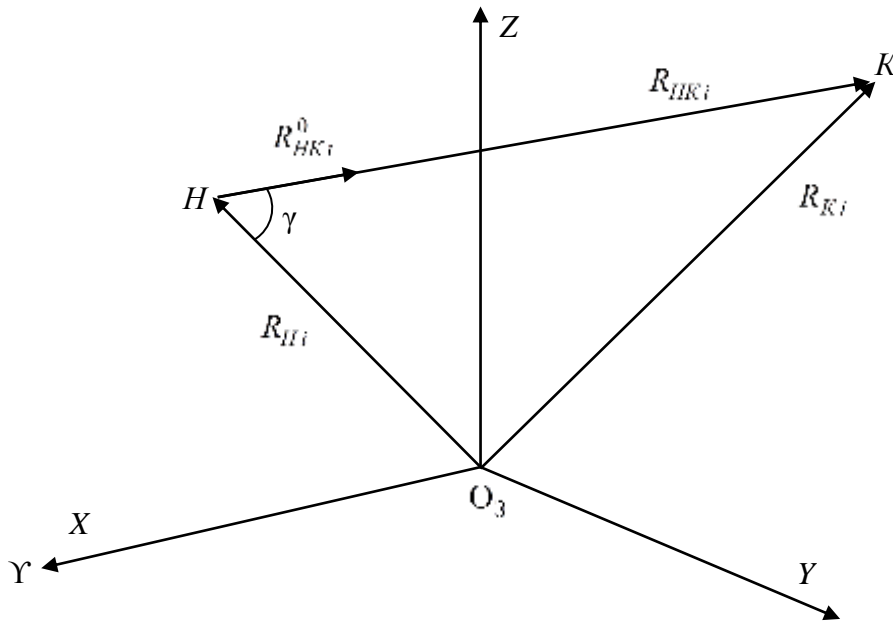


Рис. 1. Взаимное положение наблюдателя и объекта в момент t_i в АГЭСК (ось O_3X направлена в точку весеннего равноденствия Υ)

Проведенные в литературе исследования [1–3] показали, что поставленная задача Гаусса является трансцендентной и в общем виде не имеет аналитического решения. При этом для применения какого-либо численного метода решения требуется «хорошее» начальное приближение. Одним из важных конструктивных подходов к поиску начального приближения может служить подход, основанный на предположении о круговой орбите объекта K . Обоснованием правомерности такого подхода в космической навигации служит тот факт, что большое количество имеющих практический интерес космических объектов движется вокруг Земли по околокруговым орбитам с эксцентриситетом в диапазоне $[0, 0,1]$, что соответствует достаточной для практики близости к круговой орбите.

ЧАСТНЫЙ СЛУЧАЙ КРУГОВОЙ ОРБИТЫ ОБЪЕКТА НАБЛЮДЕНИЯ

Для случая круговой орбиты объекта можно записать два естественных независимых равенства всех трех радиусов-векторов:

$$(\bar{R}_{K1}, \bar{R}_{K1}) = (\bar{R}_{K2}, \bar{R}_{K2}); (\bar{R}_{K3}, \bar{R}_{K3}) = (\bar{R}_{K1}, \bar{R}_{K1}).$$

Подставляя в эти равенства выражения радиусов-векторов через дальности, после несложных преобразований можно получить систему из двух уравнений относительно трех неизвестных дальностей:

$$(\bar{R}_{H1}, \bar{R}_{H1}) + D_1 \cdot [2 \cdot (\bar{R}_{H1}, \bar{R}_{HK1}^0)] + D_1^2 = (\bar{R}_{H2}, \bar{R}_{H2}) + D_2 \cdot [2 \cdot (\bar{R}_{H2}, \bar{R}_{HK2}^0)] + D_2^2,$$

$$(\bar{R}_{H3}, \bar{R}_{H3}) + D_3 \cdot 2 \cdot (\bar{R}_{H3}, \bar{R}_{HK3}^0) + D_3^2 = (\bar{R}_{H1}, \bar{R}_{H1}) + D_1 \cdot [2 \cdot (\bar{R}_{H1}, \bar{R}_{HK1}^0)] + D_1^2.$$

Для получения замкнутой системы данные два уравнения могут быть дополнены еще одним, вытекающим из решения уравнения (2) относительно неизвестных коэффициентов a и

b . С учетом выражения радиусов-векторов через дальности (4), опуская сложные и громоздкие преобразования, дополнительное уравнение можно получить в виде прямого соотношения между дальностями:

$$D_3 = \frac{a_1 \cdot D_1 \cdot D_2 + b_1 \cdot D_1 + c_1 \cdot D_2 + d_1}{a_2 \cdot D_1 \cdot D_2 + b_2 \cdot D_1 + c_2 \cdot D_2 + d_2}, \quad (5)$$

где коэффициенты a_i, b_i, c_i, d_i , при $i = 1, 2$, достаточно просто выражаются через координаты векторов $\bar{R}_{Hj}, \bar{R}_{HKj}^0$, $j = 1, 2, 3$.

Из первого уравнения полученной выше системы можно косвенно выразить дальность D_2 через дальность D_1 :

$$\Delta_2 = \pm \sqrt{\Delta_1^2 - (\bar{R}_{H1}, \bar{R}_{HK1}^0)^2 + (\bar{R}_{H2}, \bar{R}_{HK2}^0)^2 + (\bar{R}_{H1}, \bar{R}_{H1}) - (\bar{R}_{H2}, \bar{R}_{H2})},$$

где $\Delta_1 = D_1 + (\bar{R}_{H1}, \bar{R}_{HK1}^0)$; $\Delta_2 = D_2 + (\bar{R}_{H2}, \bar{R}_{HK2}^0)$.

Знак в данном выражении выбирается исходя из положительного значения дальности D_2 .

Из второго уравнения системы можно получить выражение

$$\Delta_3^2 + (\bar{R}_{H3}, \bar{R}_{H3}) - (\bar{R}_{H3}, \bar{R}_{HK3}^0)^2 = \Delta_1^2 + (\bar{R}_{H1}, \bar{R}_{H1}) - (\bar{R}_{H1}, \bar{R}_{HK1}^0)^2.$$

Нетрудно заметить, что после перехода к новым переменным Δ_1 и Δ_2 соотношение для третьей дальности D_3 можно записать в новых переменных без изменения его структуры только с измененными постоянными коэффициентами. При этом с учетом выражения для Δ_2 можно получить выражение Δ_3 только через переменную Δ_1 . В результате окончательно получается обобщенное уравнение относительно одной переменной Δ_1 :

$$\left[\frac{\pm (a_{11} \cdot \Delta_1 + q_1) \cdot \sqrt{\Delta_1^2 - A + s_1 \cdot \Delta_1 + r_1}}{\pm (a_2 \cdot \Delta_1 + q_2) \cdot \sqrt{\Delta_1^2 - A + s_2 \cdot \Delta_1 + r_2}} \right]^2 - \Delta_1^2 = B, \quad (6)$$

где

$$A = (\bar{R}_{H1}, \bar{R}_{HK1}^0)^2 - (\bar{R}_{H2}, \bar{R}_{HK2}^0)^2 - (\bar{R}_{H1}, \bar{R}_{H1}) + (\bar{R}_{H2}, \bar{R}_{H2});$$

$$B = (\bar{R}_{H3}, \bar{R}_{HK3}^0)^2 - (\bar{R}_{H1}, \bar{R}_{HK1}^0)^2 - (\bar{R}_{H3}, \bar{R}_{H3}) + (\bar{R}_{H1}, \bar{R}_{H1});$$

$$q_1 = c_{11} - a_{11} \cdot (\bar{R}_{H1}, \bar{R}_{HK1}^0); \quad q_2 = c_2 - a_2 \cdot (\bar{R}_{H1}, \bar{R}_{HK1}^0);$$

$$s_1 = b_{11} - a_{11} \cdot (\bar{R}_{H2}, \bar{R}_{HK2}^0); \quad s_2 = b_2 - a_2 \cdot (\bar{R}_{H2}, \bar{R}_{HK2}^0);$$

$$r_1 = d_{11} - s_1 \cdot (\bar{R}_{H1}, \bar{R}_{HK1}^0) - c_{11} \cdot (\bar{R}_{H2}, \bar{R}_{HK2}^0); \quad r_2 = d_2 - s_2 \cdot (\bar{R}_{H1}, \bar{R}_{HK1}^0) - c_2 \cdot (\bar{R}_{H2}, \bar{R}_{HK2}^0);$$

$$a_{11} = a_1 + a_2 \cdot (\bar{R}_{H3}, \bar{R}_{HK3}^0); \quad b_{11} = b_1 + b_2 \cdot (\bar{R}_{H3}, \bar{R}_{HK3}^0);$$

$$c_{11} = c_1 + c_2 \cdot (\bar{R}_{H3}, \bar{R}_{HK3}^0); \quad d_{11} = d_1 + d_2 \cdot (\bar{R}_{H3}, \bar{R}_{HK3}^0).$$

Знаки в числителе и знаменателе выражения (6) выбираются одинаковыми.

Нетрудно заметить, что после определения Δ_1^* в уравнении (6) остальные неизвестные величины определяются по аналитическим формулам:

$$\Delta_2^* = \pm \sqrt{\Delta_1^* - (\bar{R}_{H1}, \bar{R}_{HK1}^0)^2 + (\bar{R}_{H2}, \bar{R}_{HK2}^0)^2 + (\bar{R}_{H1}, \bar{R}_{H1}) - (\bar{R}_{H2}, \bar{R}_{H2})}; \quad (7)$$

$$\Delta_3^* = \frac{\pm (a_{11} \cdot \Delta_1^* + q_1) \cdot \sqrt{(\Delta_1^*)^2 - A} + s_1 \cdot \Delta_1^* + r_1}{\pm (a_2 \cdot \Delta_1^* + q_2) \cdot \sqrt{(\Delta_1^*)^2 - A} + s_2 \cdot \Delta_1^* + r_2}. \quad (8)$$

Уравнение (6) имеет две ветви решения в зависимости от выбора знака первых слагаемых в числителе и знаменателе. Кроме того, очевидно, что уравнение (6) является по сути уравнением 12-й степени и его решение в общем виде возможно получить только численным методом. Поэтому важно также определить диапазон варьирования независимой переменной Δ_1 .

Из уравнения (6) видно, что нижней границей варьирования величины Δ_1 является условие

$$\Delta_{1\min} > \sqrt{A} \text{ при } A \geq 0, \text{ либо } \Delta_{1\min} > -\sqrt{|A|} \text{ при } A < 0.$$

Для расчета верхней границы можно воспользоваться геометрическим построением, представленным на рис. 2. В i -й момент изменения направления на объект K по трем точкам O_3, H_i, K_i можно построить треугольник наблюдения, сторонами которого являются радиусы-векторы $\bar{R}_{Hi}, \bar{R}_{Ki}$ и дальности D_i (рис. 2).

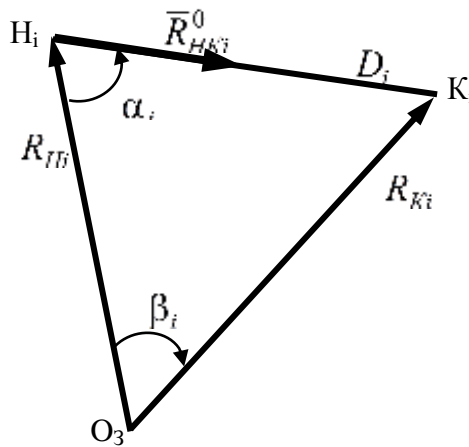


Рис. 2. Треугольник наблюдения объекта в i -й момент времени

Из данного треугольника по теореме синусов можно получить формулу связи между дальностью D_i и углом β_i :

$$\frac{D_i}{\sin \beta_i} = \frac{R_{Hi}}{\sin(\pi - \beta_i - \alpha_i)}.$$

Учитывая, что при $\sin(\pi - \beta_i) = \sin(\beta_i)$, $\cos(\pi - \beta_i) = -\cos \beta_i$ можно выразить

$$\sin(\pi - \beta_i - \alpha_i) = \sin \beta_i \cdot \cos \alpha_i + \cos \beta_i \cdot \sin \alpha_i.$$

Формулу связи между дальностью D_i и углом β_i можно получить в явном виде:

$$D_i = R_{Hi} \cdot \frac{\sin \beta_i}{\cos \alpha_i \cdot \sin \beta_i + \sin \alpha_i \cdot \sqrt{1 - \sin^2 \beta_i}}.$$

При этом с учетом свойства треугольника область определения угла β_i имеет следующий вид:

$$\beta_i \in (0, \pi - \alpha_i).$$

Из этого условия и соотношения дальности с углом легко находится верхняя граница варьирования дальности:

$$D_{i \max} = \frac{R_{Hi}}{2 \cdot |\cos \alpha_i|}. \quad (9)$$

Выбор корня уравнения (6) связан с проверкой соответствия времени полета объекта K между парами радиусов-векторов из тройки \bar{R}_{Kj} , $j = 1, 2, 3$, получаемой по формулам (3) при известных дальностях $D_j^* = \Delta_j^* - (\bar{R}_{Hj}, \bar{R}_{HKj}^0)$. Очевидно, что при этом условие соответствия времени можно преобразовать в условие соответствия углов. Например, для пары векторов \bar{R}_{K1} и \bar{R}_{K2} данное условие можно представить в виде

$$F_{12} = \left| \frac{\bar{R}_{K1} \cdot \bar{R}_{K2}}{|\bar{R}_{K1}| \cdot |\bar{R}_{K2}|} - \cos(\lambda \cdot (t_2 - t_1)) \right| = 0, \quad (10)$$

где λ – угловая скорость вращения по орбите объекта K , $\lambda = \sqrt{\mu_0 / |\bar{R}_{K1}|^3}$;

μ_0 – гравитационная постоянная Земли.

Окончательное решение выбирается из всех действительных корней уравнения (6) по условию $\min_{\{\Delta_j^*\}} F_{12}$.

Пример расчетов при решении уравнения (6) для частного случая орбит H и K представлен на рис. 3.

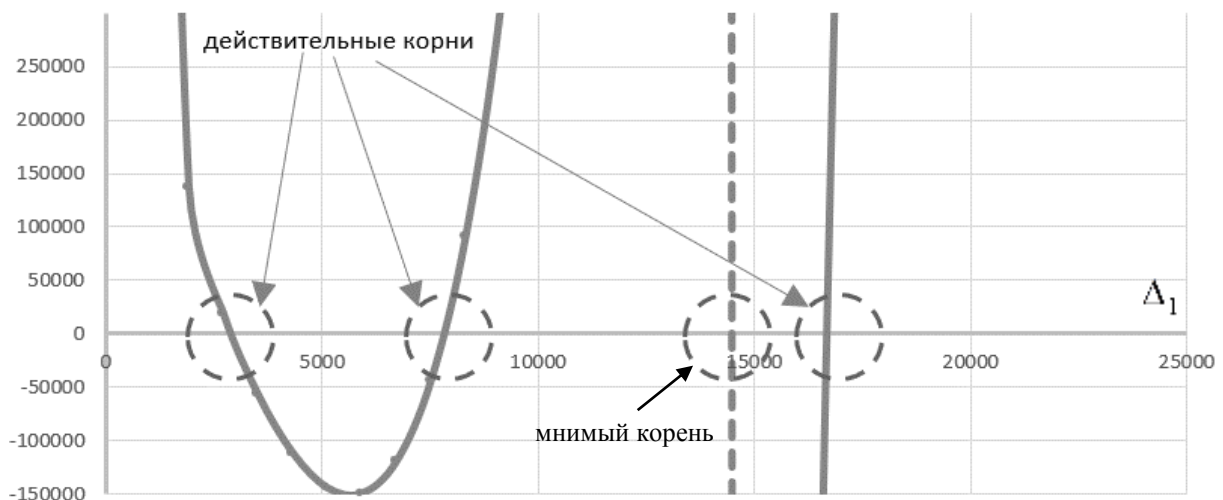


Рис. 3. Пример графика погрешности (правая часть минус левая часть) решения уравнения (6) на расчетном интервале

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный в данной статье метод определения круговых орбит по трем угловым измерениям может использоваться для получения «хорошего» начального приближения решения задачи Гаусса в общей постановке.

Следует отметить, что в литературе по астрономии [2] хорошо известен и метод Харцера, также позволяющий определять по трем угловым измерениям движения объекта K параметры круговой орбиты, в определенном смысле хорошо представляющим эти три измерения. Однако метод Харцера является по сути объединением нескольких сопряженных итерационных процессов, требует гораздо более существенных вычислительных затрат, чем предложенное в данной статье простое решение одного алгебраического уравнения, и своего «хорошего» начального приближения. При этом, как показала астрономическая практика, метод Харцера не обладает точностью предложенного в статье (фактически аналитического) метода.

В качестве дальнейшего направления исследования можно предложить численный подход к решению общей задачи Гаусса из начального приближения, полученного рассмотренным в данной статье методом. Этот подход основан на применении итерационного метода Ньютона к решению системы двух уравнений Ламберта [3] применительно к двум последовательным интервалам времени наблюдения объекта K . Данная система имеет следующий вид:

$$a - \left[\frac{(t_2 - t_1) \cdot \sqrt{\mu_0}}{\varepsilon^* - \sin \varepsilon^* \mp (\delta^* - \sin \delta^*)} \right]^{\frac{2}{3}} = 0;$$

$$a - \left[\frac{(t_3 - t_2) \cdot \sqrt{\mu_0}}{\varepsilon^{**} - \sin \varepsilon^{**} \mp (\delta^{**} - \sin \delta^{**})} \right]^{\frac{2}{3}} = 0,$$

где

$$\sin^2 \frac{\varepsilon^*}{2} = \frac{|\bar{R}_{K1}| + |\bar{R}_{K2}| + |\bar{R}_{K2} - \bar{R}_{K1}|}{4 \cdot a}; \quad \sin^2 \frac{\delta^*}{2} = \frac{|\bar{R}_{K1}| + |\bar{R}_{K2}| - |\bar{R}_{K2} - \bar{R}_{K1}|}{4 \cdot a};$$

$$\sin^2 \frac{\varepsilon^{**}}{2} = \frac{|\bar{R}_{K2}| + |\bar{R}_{K3}| + |\bar{R}_{K3} - \bar{R}_{K2}|}{4 \cdot a}; \quad \sin^2 \frac{\delta^{**}}{2} = \frac{|\bar{R}_{K2}| + |\bar{R}_{K3}| - |\bar{R}_{K3} - \bar{R}_{K2}|}{4 \cdot a};$$

$$a = \frac{p}{1 - \frac{\bar{E}_1 \cdot \bar{E}_1}{|\bar{W}_1|^2}}; \quad p = \frac{|\bar{W}_1| \cdot |\bar{R}_{K3}| - |\bar{W}_2| \cdot |\bar{R}_{K2}| + |\bar{W}_3| \cdot |\bar{R}_{K1}|}{|\bar{W}_1| - |\bar{W}_2| + |\bar{W}_3|}; \quad \bar{E}_1 = (p - |\bar{R}_{K1}|) \cdot \bar{R}_{K2} - (p - |\bar{R}_{K2}|) \cdot \bar{R}_{K1};$$

$$\bar{W}_1 = \bar{R}_{K1} \times \bar{R}_{K2}; \quad \bar{W}_2 = \bar{R}_{K1} \times \bar{R}_{K3}; \quad \bar{W}_3 = \bar{R}_{K2} \times \bar{R}_{K3}.$$

Учитывая зависимости (3) и (5), данная система является замкнутой относительно двух неизвестных дальностей D_1 и D_2 и должна иметь единственное решение.

Список используемых источников

1. Дубяго А. Д. Определение орбит. – Л.: Гос. изд-во техн.-теорет. лит., 1949. – 444 с.
2. Субботин М. Ф. Введение в теоретическую астрономию. – М.: Наука, 1968. – 800 с.
3. Эльясберг П. Е. Введение в теорию полета искусственных спутников Земли. – М., 1965. – 540 с.

А. Е. Воронин,
кандидат технических наук;
Н. Е. Пешехонов,
кандидат технических наук, доцент;
В.В. Рыбаков,
кандидат технических наук

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТЬЮ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ВАЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Рассмотрены и конкретизированы принципы системного подхода исследования надежности систем электропитания важных объектов. Представлены основы концепции управления надежностью систем электропитания. Предложен математический аппарат решений задач верхнего уровня иерархии управления надежностью систем электропитания важных объектов, который можно применять как в условиях ограниченных исходных данных по надежности, так и на основе получения закономерностей отказов систем важных объектов в процессе их эксплуатации.

Ключевые слова: надежность системы электропитания, принципы системного подхода, концепция управления надежностью.

ВВЕДЕНИЕ

Особое место в динамике развития и функционирования Российской Федерации занимает обеспечение надежности функционирования важных объектов страны. Под важными объектами (ВО) страны будем понимать объекты, аварийная остановка которых приведет к серьезным последствиям для населения – к снижению безопасности жизнедеятельности.

Высокие требования к надежности всех составляющих ВО определяют создание особой системы научного, конструкторского, проектного и эксплуатационного сопровождения решения задач надежности на всех стадиях жизненного цикла системы управления надежностью.

Под управлением надежностью понимается процесс задания требований, обеспечения, оценки, прогнозирования и контроля заданного выходного эффекта.

Понятие выходного эффекта подразумевает под собой события и (или) величины, характеризующие результаты решения поставленных задач.

Надежностью ВО называется совокупность ее свойств, обеспечивающих получение выходного эффекта не менее заданного значения в течение заданного промежутка времени.

В комплексе технических средств ВО, обеспечивающих его функционирование, важное место занимает система электропитания (СЭС). Под СЭС ВО понимается совокупность устройств, предназначенных для приема, преобразования, распределения и генерирования электроэнергии.

Значимость системы электропитания в процессе функционирования ВО особенно велика в связи с наличием в его составе значительного количества высокотехнологического электрооборудования, электронно-вычислительных машин и других приемников электроэнергии, предъявляющих высокие требования к показателям надежности (ПН) и качеству электрической энергии. Перерыв в электропитании приводит к нарушению процесса систем, входящих в состав ВО. В связи с этим, требования к надежности являются одними из главных требований, предъявляемых к СЭС ВО.

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ВАЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Очевидно, что СЭС ВО являются сложными системами, как с гносеологических, так и с онтологических позиций, и исследование их надежности должно производиться на основе общих методологических положений системного подхода. В современной науке существует ряд принципов, которые необходимо применять при решении задач исследования надежности СЭС ВО.

1. *Принцип системности.* СЭС ВО должна рассматриваться как совокупность взаимосвязанных подсистем и элементов. При исследовании СЭС ВО, как и при исследовании всякой большой системы, должны применяться методы декомпозиции и агрегирования. Декомпозиция СЭС на подсистемы и элементы должна соответствовать сложившейся системе создания, испытаний и эксплуатации. Этому требованию удовлетворяет принятое разделение СЭС ВО на подсистемы внешнего и внутреннего электроснабжения, СЭС зданий (сооружений), систему наземного электроснабжения спецтоками. Под элементами понимаются объекты системы, не подлежащие декомпозиции в рамках данной задачи. При исследовании надежности СЭС ВО в качестве элемента выделяются электрические аппараты, линии электропередачи, силовые трансформаторы, резервные источники электроснабжения и другие электроустановки.

2. *Принцип иерархичности и целевой принцип.* СЭС ВО является составной частью объекта и ее целевая функция надежности $R_{\text{сэс}}(r_{\text{элемент сэс}})$ подчинена целевой функции надежности ВО $R_{\text{во}}(R_{\text{сэс}}, R_{\text{сис.2}}, \dots, R_{\text{сис.n}})$. В связи с данным принципом, при декомпозиции системы должны выполняться следующие правила: каждая подсистема и каждый элемент должны иметь собственную четко выраженную задачу, причем задачи подсистемы (элементов) одного иерархического уровня должны быть примерно равнозначны; совместное выполнение задач всех подсистем (элементов) одного уровня в соответствующем порядке и в соответствующие сроки должно обеспечить решение задачи объектов высшего иерархического уровня.

Если отнести ВО к элементам 1-го уровня, то СЭС ВО будет элементом 2-го уровня, а подсистемы и элементы СЭС соответственно элементами 3-го и 4-го уровней иерархии. Принцип иерархического строения находит отражение не только в структуре СЭС и ВО в целом, но и в процессах их функционирования, в постановке и решении задач исследования надежности, в моделях, отражающих те или иные аспекты исследования надежности.

3. *Принцип многомодельности.* Достаточно полное исследование проблемы надежности СЭС ВО возможно лишь при использовании нескольких моделей, к которым относятся: концептуальные – модели теории отношений, модели массового обслуживания; имитационные модели – сетевые модели, экономико-математические модели; аналитические – автоматные модели, модели математического программирования; физические и натурные – модели цепей Маркова, модели на основе дифференциальных уравнений.

4. *Принцип диалектического сочетания детерминизма и антидетерминизма.* Под данным принципом понимается, что исследование надежности СЭС ВО, как правило, осуществляется в условиях неопределенности исходной информации. Неопределенность информации о надежности СЭС ВО обусловлена вероятностной природой случайных факторов (отказы элементов СЭС, условия функционирования, воздействие внешней среды и т. п.), воздействующих на процессы функционирования СЭС. При исследовании надежности СЭС ВО требуется раскрыть неопределенности целевых функций СЭС и ВО в целом, структуры (состава подсистем и элементов, а также связей между ними), технических характеристик и свойств, условий функционирования и факторов, влияющих на надежность, событий и состояний, характеризующих нормальные и аварийные режимы функционирования и др. Для того, чтобы уйти от неоднозначности, в зависимости от поставленных задач исследования,

рекомендуется использовать методы исследования, такие как: математическое и физическое моделирование, анализ и обработка ретроспективной информации, проведение натурных и лабораторных экспериментов, проведение экспертной оценки.

Известно, что абсолютное раскрытие неопределенности невозможно, поэтому при математическом моделировании исследуемых объектов неизбежны исходные допущения, введение которых обуславливает ту или иную степень детерминированности моделей.

Рассмотренные методологические основы исследования надежности СЭС ВО позволяют приступить к построению концептуальной модели управления надежностью электроснабжения.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФОРМАЛИЗАЦИЯ РЕШЕНИЙ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТЬЮ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ВАЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Комплекс основных задач и аспектов проблемы управления надежностью СЭС ВО удобно представить в виде иерархического графа, вершины которого интерпретируются как цели и задачи, а дуги – связи между ними (рис. 1).



Рис. 1. Граф целей и задач управления надежностью СЭС ВО

Верхний уровень иерархии целей и задач управления надежностью СЭС ВО состоит из трех основных блоков (задание требований к надежности СЭС, оценивание надежности СЭС, обеспечение надежности СЭС), которым необходимо уделить особое внимание при разработке концептуальной модели управления надежностью СЭС ВО.

Задание требований к надежности СЭС подразумевает: определение номенклатуры ПН; обоснование значения (нормирование) ПН и доверительных границ; формирование организационных и технических требований по обеспечению надежности.

При проектировании ВО требования к его надежности, как правило, задаются в целом для объекта [1]. В этих условиях данная задача сводится к обоснованию количественных требований к надежности составляющих его систем (в том числе СЭС), путем распределения показате-

теля надежности ВО между составляющими его системами. Распределить количественные требования необходимо так, чтобы общая надежность систем ВО была не менее заданной.

Решая вопрос распределения ПН, необходимо знать значимость каждой системы ВО (степень участия рассматриваемых систем в процессе надежного функционирования объекта). Существуют различные методы распределения ПН между системами ВО, которые приведены ниже.

Метод весовых коэффициентов [2]:

$$p_i = 1 - \alpha_i(1 - P_{\text{во}}), \quad i = \overline{1, N}, \quad (1)$$

где α_i – весовой коэффициент,

$$\alpha_i = \frac{m_i}{m_o}.$$

Здесь m_o – общее число отказов ВО, а m_i – число отказов i -й системы ВО. При

этом следует учесть, что $\sum_{i=1}^N \alpha_i = 1$;

p_i – вероятность безотказной работы i -й системы ВО;

$P_{\text{во}}$ – вероятность безотказной работы ВО;

N – число систем, составляющих ВО.

Методы, основанные на решении оптимизационных задач:

$$\begin{cases} \prod_{i=1}^N p_i \geq P_{\text{во}} \\ \sum_{i=1}^N C_i(p_i) \rightarrow \min \end{cases}, \quad (2)$$

где $\prod_{i=1}^N p_i$ – вероятностная функция надежности ВО;

$C_i(p_i)$ – функция зависимости экономических показателей от показателя надежности систем ВО.

Метод равномерного распределения [3]:

$$p_i = \sqrt[N]{P_{\text{во}}}, \quad P_{\text{во}} \leq \prod_{i=1}^N p_i. \quad (3)$$

Существующие методы распределения количественных требований ВО в большей степени основаны на показателях надежности ВО и составляющих его систем. Как правило, ВО – уникальные объекты с ограниченной статистикой отказов. В этом случае авторами предлагается математическая модель определения требуемых значений ПН СЭС объекта, «работающая» в условиях вероятностно-ограниченной информации [3]:

$$F(\text{ПН}_{\text{во}}, R_{\text{сэс}}, f(R)), \quad (4)$$

где $\text{ПН}_{\text{во}}$ – нормативное значение показателя надежности, заданного для важного объекта в целом;

$R_{\text{сэс}}$ – ранг системы электроснабжения ВО;

$f(R)$ – функционал надежности ВО.

Ранг системы электроснабжения ВО вычисляется по формуле

$$R_{сэс} = \frac{\sum_{p=1}^n \omega_p \sum_{j=1}^{n-1} L_{pcэсj}}{\sum_{p=1}^n \omega_p \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^{n-1} L_{pij}}, \quad (5)$$

где ω_p – корень характеристического уравнения матрицы функциональных связей систем ВО;
 L_{pij} – элемент i -й строки j -го столбца главного минора L_p матрицы функциональных связей систем ВО;
 $L_{pcэсj}$ – элемент строки главного минора L_p , определяемый связями СЭС с другими системами ВО;
 n – порядок характеристического уравнения матрицы функциональных связей систем ВО.

Функционал надежности ВО определяется выражением

$$f(R) = \sum_{j=1}^k \frac{a_j}{\sum_{\forall(z_i \in Z_j)} z_i^{-1}}, \quad Z_j = \{R_i\}, \quad i = \overline{1, N} \quad (6)$$

где k – число слагаемых в функционале надежности ВО;
 j – номер слагаемого в функционале надежности ВО;
 a_j – коэффициент при j -м слагаемом функционала надежности ВО;
 Z_j – множество значений рангов систем, входящих в j -е слагаемое функционала надежности ВО;
 z_i – i -й элемент множества Z_j .

Модель (4) включает в себя степень значимости СЭС в процессе функционирования ВО на основе анализа функциональных связей составляющих его систем и вероятностной функции надежности рассматриваемого объекта. Применение данной модели позволяет определить требуемые значения показателей надежности СЭС путем распределения нормативных значений показателей надежности специального объекта, выраженных как единичными, так и комплексными показателями, между системами объекта с учетом их значимости.

Оценивание надежности СЭС – процедура принятия решения о надежности СЭС ВО, включающая в себя количественную оценку ПН, сравнение полученных значений ПН с заданными, принятие решения о выполнении заданных требований, контроль и прогнозирование надежности СЭС в течение заданного интервала времени.

В соответствии с требованиями нормативных документов [1], оценка надежности должна выполняться на основных стадиях жизненного цикла объекта (при проектировании, по завершению каждого этапа испытаний, ежегодно в процессе эксплуатации).

В зависимости от стадии, которая обуславливает соответствующий объем и содержание исходных данных по надежности элементов и СЭС ВО в целом, применяются различные методы оценки ПН: расчетные, расчетно-экспериментальные и экспериментальные.

К настоящему времени разработан и применяется научно-методический аппарат, достаточно полно охватывающий возможные частные случаи оцениваемых объектов. Однако область применения известных методов для расчета надежности систем энергетики вообще и СЭС ВО особенно, весьма ограничена ввиду уникальности большинства из них.

Для реализации процесса оценивания надежности СЭС ВО предлагается использовать разработанную авторами на ЭВМ программу автоматизированного математического моделирования и расчета ПН системы внутреннего электроснабжения объекта [6], основанную на математической модели, которую в общем виде можно представить выражением

$$\begin{aligned}
 P_{\text{СЭС ВО}}(D_1 \vee D_2 \vee \dots \vee D_j \vee \dots \vee D_N) = & \sum_{j=1}^N \prod_{\forall (p_i \in D_j)} p_i - \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{l=j+1}^N \prod_{\forall (p_i \in D_{jl})} p_i + \\
 & + \sum_{j=1}^{N-2} \sum_{l=j+1}^{N-1} \sum_{s=j+2}^N \prod_{\forall (p_i \in D_{jls})} p_i - \dots + (-1)^{N+1} \prod_{\forall (p_i \in D_{j\dots d})} p_i, \quad (7) \\
 & D_j, D_{jl}, D_{jls}, D_{j\dots d} \subset D, j = \overline{1, N},
 \end{aligned}$$

где $D_j, D_{jl},$

$D_{jls}, D_{j\dots d}$ – комбинации кратчайших путей работоспособного состояния СЭС ВО;
 j, l, s, d – номера комбинаций кратчайших путей работоспособного состояния СЭС;

$P_{\text{СЭС ВО}}$ – вероятность безотказной работы СЭС ВО;

D – множество всех возможных кратчайших путей работоспособного состояния СЭС ВО;

p_i – вероятность безотказной работы i -го элемента СЭС ВО.

Если принять допущение, что каждый элемент системы работает и восстанавливается не зависимо друг от друга, то в выражении (7) вероятность безотказной работы СЭС и ее i -х элементов можно заменить на коэффициенты готовности [6].

Допустим, что каждый элемент системы отказывает независимо друг от друга, то в математической модели (7) переменную $P_{\text{СЭС ВО}}$ и p_i можно заменить на коэффициенты готовности [7].

Преимущество данной математической модели (7) по сравнению с другими подходами к оценке ПН, заключается в том, что при определенной адаптации ее можно применять не только для контроля, но и для прогнозирования надежности СЭС ВО в течение заданного интервала времени. В этом случае необходимо определить закономерности отказов i -х элементов СЭС ВО на основных стадиях жизненного цикла объекта.

Обеспечение надежности СЭС – планирование и осуществление комплекса мероприятий, направленных на выполнение заданных требований по надежности, в процессе разработки, производства и эксплуатации ВО.

Известно, что методы повышения надежности СЭС можно условно разделить на технические и организационные. Многие организационные мероприятия выполняются на начальных этапах жизненного цикла объекта, либо активно применяются в процессе эксплуатации. Резервирование, увеличение ПН элементов СЭС, бесперебойность работы, увеличение интенсивности восстановления осуществляется, в большей степени, после выявления несоответствия ПН СЭС объекта заданным требованиям в процессе эксплуатации. Поэтому в целях обеспечения требуемого ПН СЭС объекта необходимо уделить особое внимание техническим мероприятиям, которые могут быть реализованы как в сочетании, так и по одиночке.

Авторами для обеспечения требуемого уровня надежности за счет технических мероприятий решена двухкритериальная оптимизационная задача [7].

Первый критерий оптимальности – максимальное значение ПН ($P_{\text{СЭС ВО}}$ или $K_{\Gamma \text{ СЭС ВО}}$) СЭС ВО, не выходящее за предел нижней доверительной границы обоснованного ПН. Вто-

рой критерий оптимальности – минимум экономических затрат на реализацию g -го сочетания мероприятий.

С целью согласования экстремума критериев оптимизации предлагается вместо $P_{\text{СЭС ВО}}$ или $K_{\text{Г СЭС ВО}}$ СЭС необходимо рассматривать вероятность отказа ($Q_{\text{СЭС ВО}}$) и коэффициента неготовности ($K_{\text{НГ СЭС ВО}}$) соответственно.

Целевые функции для каждого критерия оптимальности на основе выражения (7) имеют вид:

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{СЭС ВО}}(X) &= 1 - P_{\text{СЭС ВО}}(X) = \\
 &= 1 - \left(\sum_{j=1}^N \prod_{\forall (p_i \in D_j)} p_i \cdot \left(\sum_{\substack{\forall (p_{ik}^a \in D_j) \\ \forall (a_{ik} \in M_j)}} p_{ik}^a a_{ik} \right) \left(\sum_{\substack{\forall (p_{ik}^{b'} \in D_j) \\ \forall (b'_{ik} \in M_j)}} p_{ik}^{b'} b'_{ik} \right) \left(\sum_{\substack{\forall (p_{ik}^{b''} \in D_j) \\ \forall (b''_{ik} \in M_j)}} p_{ik}^{b''} b''_{ik} \right) \left(\sum_{\substack{\forall (p_{ik}^z \in D_j) \\ \forall (z_{ik} \in M_j)}} p_{ik}^z z_{ik} \right) \right) - \\
 &- \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{l=j+1}^N \prod_{\forall (p_i \in D_{jl})} p_i \cdot \left(\sum_{\substack{\forall (p_{ik}^a \in D_{jl}) \\ \forall (a_{ik} \in M_{jl})}} p_{ik}^a a_{ik} \right) \left(\sum_{\substack{\forall (p_{ik}^{b'} \in D_{jl}) \\ \forall (b'_{ik} \in M_{jl})}} p_{ik}^{b'} b'_{ik} \right) \left(\sum_{\substack{\forall (p_{ik}^{b''} \in D_{jl}) \\ \forall (b''_{ik} \in M_{jl})}} p_{ik}^{b''} b''_{ik} \right) \left(\sum_{\substack{\forall (p_{ik}^z \in D_{jl}) \\ \forall (z_{ik} \in M_{jl})}} p_{ik}^z z_{ik} \right) + \\
 &+ \sum_{j=1}^{N-2} \sum_{l=j+1}^{N-1} \sum_{s=j+2}^N \prod_{\forall (p_i \in D_{jls})} p_i \cdot \left(\sum_{\substack{\forall (p_{ik}^a \in D_{jls}) \\ \forall (a_{ik} \in M_{jls})}} p_{ik}^a a_{ik} \right) \left(\sum_{\substack{\forall (p_{ik}^{b'} \in D_{jls}) \\ \forall (b'_{ik} \in M_{jls})}} p_{ik}^{b'} b'_{ik} \right) \left(\sum_{\substack{\forall (p_{ik}^{b''} \in D_{jls}) \\ \forall (b''_{ik} \in M_{jls})}} p_{ik}^{b''} b''_{ik} \right) \left(\sum_{\substack{\forall (p_{ik}^z \in D_{jls}) \\ \forall (z_{ik} \in M_{jls})}} p_{ik}^z z_{ik} \right) - \dots \\
 &\dots + (-1)^{N+1} \prod_{\forall (p_i \in D_{j\dots d})} p_i \cdot \left(\sum_{\substack{\forall (p_{ik}^a \in D_{j\dots d}) \\ \forall (a_{ik} \in M_{j\dots d})}} p_{ik}^a a_{ik} \right) \left(\sum_{\substack{\forall (p_{ik}^{b'} \in D_{j\dots d}) \\ \forall (b'_{ik} \in M_{j\dots d})}} p_{ik}^{b'} b'_{ik} \right) \left(\sum_{\substack{\forall (p_{ik}^{b''} \in D_{j\dots d}) \\ \forall (b''_{ik} \in M_{j\dots d})}} p_{ik}^{b''} b''_{ik} \right) \left(\sum_{\substack{\forall (p_{ik}^z \in D_{j\dots d}) \\ \forall (z_{ik} \in M_{j\dots d})}} p_{ik}^z z_{ik} \right) \rightarrow \min_{X \in M},
 \end{aligned} \tag{8}$$

$$C_{\text{СЭС ВО}}(X) = \sum_{k=1}^{n_i} \sum_{\forall (a_{ik} \in A)} a_{ik} c_{ik}^a + \sum_{k=1}^{n_i} \sum_{\forall (b'_{ik} \in B)} b'_{ik} c_{ik}^{b'} + \sum_{k=1}^{n_i} \sum_{\forall (b''_{ik} \in B)} b''_{ik} c_{ik}^{b''} + \sum_{k=1}^{n_i} \sum_{\forall (z_{ik} \in Z)} z_{ik} c_{ik}^z \rightarrow \min_{X \in M}. \tag{9}$$

Здесь $M_j, M_{jl}, M_{jls}, M_{j\dots d}$ – множества сочетаний мероприятий в каждой из соответствующих комбинаций кратчайших путей работоспособного состояния СЭС ВО,

$$M_j, M_{jl}, M_{jls}, M_{j\dots d} \subset M; ,$$

где M – множество допустимых мероприятий, направленных на повышение надежности СЭС ВО;

$D_j, D_{jl}, D_{jls}, D_{j\dots d}$ – комбинации кратчайших путей работоспособного состояния СЭС ВО,

$$D_j, D_{jl}, D_{jls}, D_{j\dots d} \subset D; ,$$

где D – множество всех возможных кратчайших путей работоспособного состояния СЭС ВО;

$p_{ik}^a, p_{ik}^{b'}, p_{ik}^{b''}, p_{ik}^z$ – вероятность безотказной работы i -го элемента СЭС ВО k -го вида, который участвует в мероприятиях;

$a_{ik}, b'_{ik}, b''_{ik}, z_{ik}$	– булевы переменные целевых функций i -го элемента СЭС ВО k -го вида;
$P_{\text{сэсг}}(X)$	– вероятность безотказной работы СЭС ВО при реализации g -го сочетания мероприятий;
$Q_{\text{сэсг}}(X)$	– вероятность отказа СЭС ВО при реализации g -го сочетания мероприятий;
X	– множество варьируемых переменных целевых функций, $X \in M$;
p_i	– вероятность безотказной работы i -го элемента СЭС ВО, который не участвует в мероприятиях;
$C_{\text{сэсг}}(X)$	– экономический показатель при реализации g -го сочетания мероприятий;
$c_{ik}^a, c_{ik}^b, c_{ik}^{b'}, c_{ik}^z$	– экономические затраты на реализацию мероприятий соответственно первой, второй и третьей группы на i -м элементе СЭС k -го вида;
A, B, Z	– множество мероприятий соответственно первой, второй и третьей группы.

В выражениях (8) и (9) булевыми переменными формализуется выполнение (переменная принимает значение 1) или отсутствие мероприятия (переменная принимает значение 0). В качестве примера, в данной оптимизационной задаче применяются следующие технические мероприятия:

a – установка устройств автоматического включения резерва;

b', b'' – установка в систему электроснабжения дизельных электростанций (резервный источник) на каждую секцию шин;

z – замена существующих элементов СЭС ВО на более надежные.

Тем самым формируется g -е сочетание мероприятий, которое оценивается по двум показателям ($P_{\text{сэсг}}(X), C_{\text{сэсг}}(X)$). В дальнейшем g -е сочетания мероприятий подвергаются недоминированной сортировке с формированием фронта Парето, что позволяет найти оптимальные по Парето сочетания мероприятий по двум равноценным критериям ($P_{\text{сэсг}}(X) \rightarrow \max_{X \in M}$ и $C_{\text{сэсг}}(X) \rightarrow \min_{X \in M}$) и выдать результат лицу, принимающему решение, в виде фронта Парето.

Решение данной оптимизационной задачи реализовано с помощью программы для ЭВМ, разработанной авторами [10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Авторами рассмотрены основы концепции управления надежностью СЭС ВО. Предложен математический аппарат решений задач основных блоков верхнего уровня иерархии управления надежностью СЭС ВО, который можно применять как в условиях ограниченных исходных данных по надежности, так и на основе получения закономерностей отказов систем ВО в процессе его эксплуатации.

Настоящий период в области энергетики – это период перехода на цифровую энергетику страны. В связи с этим сегодня активно разрабатываются научно-методические аппараты, применение которых позволит реализовать данный переход. Представленная концепция управления надежностью может стать основой для этого процесса в сегменте повышения надежности СЭС.

Список используемых источников

1. ГОСТ 27.003–2016. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности. – М.: Изд-во стандартов, 2017. – 13 с.
2. ГОСТ 27.3.01–2005. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований к надежности. – М.: Изд-во стандартов, 2006. – 30 с.
3. Маслов А. Я., Сябаров В. З., Дединков Е. М. Надежность радиоэлектронной аппаратуры: учеб. пособие для вузов. – МО СССР, 1982. – Ч. 2. – 154 с.
4. Пешехонов Н. Е. Обоснование требований к надежности систем электроснабжения специальных объектов // Сборник докладов круглого стола Международного военно-технического форума «АРМИЯ – 2016». – Балашиха: ВА РВСН им. Петра Великого, 2016. – С. 22–28.
5. Voronin A., Peshekhonov N., Rybakov V. Method of Setting Reliability Requirements for a Power Supply System // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). 3-4 Oct. 2018. Vladivostok, Russia, 2019. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8602710/authors#authors> (дата обращения: 25.08.2022).
6. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2018610222. Программа автоматизированного математического моделирования и расчета показателей надежности системы внутреннего электроснабжения объекта / А. Е. Воронин, Н. Е. Пешехонов. – Заявл. 15.12.2017; опубл. 09.01.2018.
7. Можяев А. С., Громов В. Н. Теоретические основы общего логико-вероятностного метода автоматизированного моделирования систем. – СПб.: ВИТУ, 2000. – 145 с.
8. Китушин В. Г. Надежность энергетических систем: учеб. пособие. – Новосибирск: НГТУ, 2003. – 256 с.
9. Пешехонов Н. Е., Воронин А. Е. Выбор оптимального набора мероприятий, направленных на повышение надежности систем электроснабжения специальных объектов // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 669. – С. 169–178.
10. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2018662504. Программа определения оптимального сочетания мероприятий, направленных на повышение надежности системы внутреннего электроснабжения объекта / А. Е. Воронин, Н. Е. Пешехонов. – Заявл. 10.09.2018; опубл. 09.10.2018.

Л. К. Горшков,
доктор технических наук, профессор;
Е. Л. Лебедев,
доктор технических наук, профессор;
К. В. Румянцев

МОДЕЛЬ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛООБЛИЦОВКИ ГАЗОХОДОВ СТАРТОВОГО КОМПЛЕКСА

В работе представлена особенность функционирования металлооблицовки газоходов стартовых комплексов ракет-носителей космического назначения, которая заключается в наличии пластических деформаций, возникающих в ее конструкционном материале в условиях интенсивного нагрева при пуске ракеты. Определение значений пластических деформаций является важным элементом при оценивании остаточного ресурса данных конструкций. Однако применение прямых или косвенных измерений значений пластических деформаций затруднительно. Предложена математическая модель, позволяющая выполнять расчеты пластических деформаций, при этом учтены изменения прочностных характеристик конструкционного материала в условиях его нагрева (на примере стали Ст3), релаксация напряжений, условия механического стеснения конструкции, градиент температуры.

Ключевые слова: термоциклическая нагрузка, механическое стеснение, пластическая деформация, девиатор напряжения, тензор деформации.

ВВЕДЕНИЕ

Металлооблицовка газоходов стартового комплекса является одним из немногих элементов ракетно-космической техники, которые функционируют в условиях возникновения в их конструкционном материале пластических деформаций. Данный вид деформации (наряду с упругой деформацией) обусловлен прежде всего термическим нагружением конструкции газохода при пуске ракеты носителя. При этом параметры тепловой нагрузки характеризуются следующими значениями: суммарный тепловой поток (конвективный и лучистый) достигает значения 1–4 МВт/м², температура газового потока существенно выше температуры плавления конструкционного материала металлооблицовки, тепловое нагружение начинается с теплового удара с градиентом температур $dT/dt = 800\div 3500$ К/с [1, 2].

Общий график изменения температур наружной и внутренней сторон листа металлооблицовки стартового комплекса представлен на рис. 1.

На рисунке показано, что наблюдается неравномерный прогрев металлооблицовки по ее толщине. В течение 8 секунд внутренняя сторона листа металлооблицовки (сторона на которую воздействуют продукты сгорания при пуске РКН) нагревается до температуры выше 1000 К, в то время как наружная сторона практически не успевает прогреться. После пуска РКН (после 8-й секунды) наблюдается остывание внутренней стороны листа металлооблицовки и прогрев ее наружной стороны за счет теплового потока к ней от горячей (внутренней) стороны. После 80-й секунды остывания, температура листа по всей его толщине выравнивается, а сам уровень температур медленно снижается. Расчеты показывают, что интенсивность остывания по мере снижения градиента температур между воздухом и облицовкой газохода замедляется. Полное выравнивание температур наступает примерно через 15–17 часов.

Необходимо отметить, что в результате неравномерного прогрева (при пуске РКН) листа металлооблицовки наблюдается термостесненное состояние ее внутренних (горячих) и внешних (холодных) слоев. При этом внутренние слои при их нагреве и терморасширении будут испытывать сжимающие нагрузки в условиях механического стеснения холодными

наружными слоями, а наружные слои будут подвергаться растягивающим нагрузкам от «расширяющихся» внутренних слоев. Кроме этого, по причине высокой температуры нагрева внутренних слоев может наблюдаться снижение предела текучести (условного предела) $\sigma_{0,2}$ конструкционных материалов (повышение их пластичности), что в свою очередь приведет к повышенным значениям пластических деформаций внутренней (горячей) стороны листа металлооблицовки.

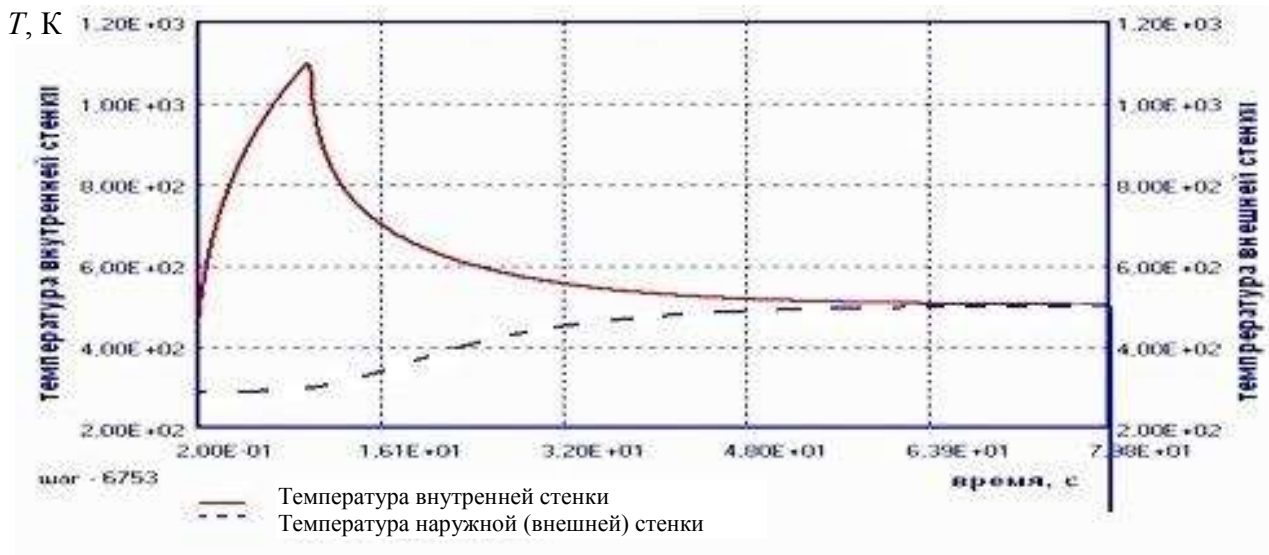


Рис. 1. График изменения температур наружной и внутренней сторон листа металлооблицовки СК

Эпюра температуры и внутренних напряжений листа металлооблицовки показана на рис. 2.

После пуска РКН, при остывании внутренних и прогреве внешних слоев листа металлооблицовки, будет наблюдаться обратный цикл ее термоциклического деформирования. В этом случае стремящиеся к сжатию внутренние слои, в условиях механического стеснения с «расширяющимися» в результате прогрева внешних слоев, будут испытывать уже растягивающие напряжения. Значения этих напряжений также могут превышать уровень $\sigma_{0,2}$, т. е. также могут наблюдаться пластические деформации, но уже не сжатия, а растяжения.

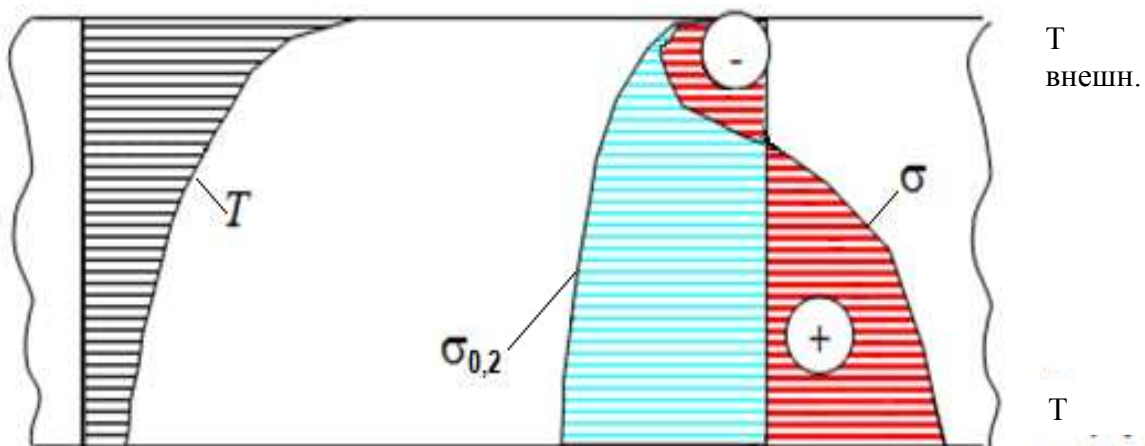


Рис. 2. Эпюра температуры и внутренних напряжений листа металлооблицовки

Наличие циклически повторяющихся знакопеременных нагрузок внутренних слоев листа металлооблицовки при пусках РКН и является основной причиной ее разрушения. Важным является то, что ресурс конструкционного материала, работающего в условиях пластических деформаций, зависит в основном от их значения. Показано, что количество знакопеременных циклов в условиях термического нагружения определяется соотношением [3]

$$N = \left(\varepsilon^p / K \varepsilon^{pi} \right)^{1/m}, \quad (1)$$

где ε^p – значения относительных пластических деформаций, возникающих в конструкционном материале при испытаниях до разрушения (пластическая составляющая относительных деформаций после разрушения);

ε^{pi} – суммарное значение относительных пластических деформаций, возникающих на i -м цикле нагружения.

Наличие коэффициентов в показателе степени m и в числителе – K в выражении (1) обусловлено усугублением процесса разрушения при действии знакопеременных нагрузок. Значения данных коэффициентов обоснованы результатами экспериментальных исследований и составляют $m \approx 3$, $K \approx 2$ [4].

Однако оценить значения возникающих относительных пластических деформаций в условиях термоциклических нагрузок достаточно проблематично, поскольку при механическом стеснении абсолютные деформации определяются суммарной деформацией «холодного» и «горячего» слоев исследуемой конструкции.

Таким образом, для оценивания ресурса металлооблицовки важным является определение пластической составляющей относительных деформаций. Решить данную задачу возможно расчетным путем, разработав математическую модель напряженно-деформированного состояния конструкции металлооблицовки газоходов стартового комплекса. При разработке данной модели, для определения деформаций внутренних слоев металлооблицовки необходимо учитывать, что в материале конструкции появляются нормальные (σ) и касательные (τ) напряжения, будут происходить явления релаксации напряжений и ползучести, могут появляться остаточные деформации и напряжения, кроме этого тепловые нагрузки носят ярко выраженный нестационарный характер. Механические свойства материала изменяются (относительно результатов стационарных исследований), из-за анизотропии конструкционных материалов их свойства изменяются во времени и в зависимости от масштаба эксплуатационных нагрузок, деформации в металле накапливаются от пуска к пуску, что является основным источником снижения работоспособности.

МОДЕЛЬ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛООБЛИЦОВКИ ГАЗОХОДОВ СТАРТОВОГО КОМПЛЕКСА В УСЛОВИЯХ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

Примем следующие допущения:

1) в представленной модели использованы зависимости механических характеристик от температуры для основного конструкционного материала металлооблицовки газоходов – углеродистая конструкционная сталь обыкновенного качества (сталь Ст3);

2) материал листа облицовки (сталь Ст3, толщиной 40 мм) обладает постоянством теплофизических свойств – теплопроводности, плотности и теплоемкости;

3) геометрия листа позволяет ставить задачу нагрева в одномерной постановке (по толщине листа);

4) отсутствует явление разупрочнения материала.

Изменение напряженно-деформированного состояния описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \{d\varepsilon\} = \{d\varepsilon_e\} + \{d\varepsilon_p\} + \{d\varepsilon_t\} + \{d\varepsilon_c\}, \\ \{d\varepsilon_e\} = \frac{\{d\sigma\}}{E(T)} * (1-\mu), \\ \{d\varepsilon_t\} = \{d\lambda(T)\} * \{dT\}, \\ \{d\varepsilon_p\} = d\mathfrak{M} * \{S\}, \\ dT = f(t) dt, \\ d\sigma_t = \{d\varepsilon_t\} * E(T), \end{array} \right. \quad (2)$$

где $\{d\varepsilon_e\}$ – тензор приращения относительной упругих деформаций;
 $\{d\varepsilon_t\}$ – тензор приращения относительной тепловых деформаций;
 $\{d\varepsilon_p\}$ – тензор приращения относительной пластических деформаций.

При этом $\{d\varepsilon_i\}$ тензор приращения относительной деформации состоит из компонентов по осям x, y, z :

$$\{d\varepsilon^i\} = \begin{Bmatrix} d\varepsilon_x^i \\ d\varepsilon_y^i \\ d\varepsilon_z^i \end{Bmatrix}. \quad (3)$$

Тензор приращения тепловых деформаций вычисляется через соотношение

$$\{d\varepsilon_t\} = \{d\lambda(T)\} \cdot \{dT\}. \quad (4)$$

Здесь $d\lambda(T)$ – коэффициент линейного расширения, который, в свою очередь, определяется следующим образом:

$$d\lambda(T) = \lambda_{20} + 0,4 \cdot 10^{-8} \cdot T_i, \quad (5)$$

где λ_{20} – коэффициент линейного расширения при $t = 20$ °С;
 T_i – температура в данный момент времени.

Тензор приращения относительной упругой деформации определяется как

$$\{d\varepsilon_e\} = \frac{\{d\sigma\}}{E(T)} \cdot (1-\mu), \quad (6)$$

где $\{d\sigma\}$ – тензор приращения упругой деформации;
 $E(T)$ – модуль упругости;
 μ – коэффициент Пуассона.

Кроме того, необходимо учитывать зависимость модуля упругости от температуры:

$$E(T) = E_{t20} + 4,8 \cdot T, \quad (7)$$

где E_{t20} – модуль упругости при $t = 20$ °С.

Если расчетные напряжения будут превосходить предел пропорциональности, т. е. если $\sigma_i > \sigma_t$, то приращение интенсивности пластических деформаций в материале газохода будет определяться следующим образом:

$$\varepsilon_p^I = \frac{\sigma - \sigma_{0,2}(T)}{E_i(T)}, \quad (8)$$

при этом зависимость $\sigma_{0,2}$ (в МПа) от температуры имеет вид

$$\sigma_{0,2}(T) = \left((\sigma_{0,2(20)} - 0.25 \cdot 10^{-2} \cdot T) - \frac{((\sigma_{0,2} - \sigma_\sigma) - 0,0177 \cdot T)}{(\varepsilon_\sigma(T) - 0,00013 \cdot T)} \right) \cdot \varepsilon_I, \quad (9)$$

где $\sigma_{0,2(20)}$ – предел текучести при $t = 20$ °С;

σ_σ – временное сопротивление разрушению (предел прочности).

Тензор приращения относительной пластической деформации определяется как

$$\{d\varepsilon_p\} = d\mathcal{M} \cdot \{S\}, \quad (10)$$

где $d\mathcal{M}$ – функция пластичности, которая вычисляется через следующее соотношение:

$$d\mathcal{M} = \frac{3}{2} d\varepsilon_p^I. \quad (11)$$

Учитывая, что девиатор напряжения $\{S\}$ определяется следующим образом:

$$\{S\} = \begin{Bmatrix} S_x \\ S_y \\ S_z \end{Bmatrix}, \quad (12)$$

$$S_i = \sigma_i - \sigma_0, \quad (13)$$

где σ_i – напряжение в i -м направлении, а гидростатическое напряжение σ_0 определяется отношением

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3}, \quad (14)$$

а также, что $\sigma_x = \sigma_y$, можно показать, что

$$\sigma_0 = \frac{2}{3} \sigma, \quad (15)$$

$$S_x = S_y = -\frac{2}{3} \sigma = \frac{1}{3} \sigma, \quad (16)$$

$$S_z = 0 - \frac{2}{3} \sigma = -\frac{2}{3} \sigma. \quad (17)$$

Таким образом, приращение пластических деформаций будет определяться как

$$d\varepsilon_x^p = d\varepsilon_y^p = \frac{3}{2} \cdot d\varepsilon_I^p \cdot \frac{1}{3} \cdot \sigma = \frac{d\varepsilon_I^p}{2}. \quad (18)$$

Относительные деформации определяются соотношением

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}, \quad (19)$$

где Δl – абсолютные деформации;

l_0 – начальный размер объекта исследования.

Расчетная схема оценивания абсолютных деформаций стесненного состояния верхнего нагреваемого слоя металлооблицовки изображена на рис. 3.

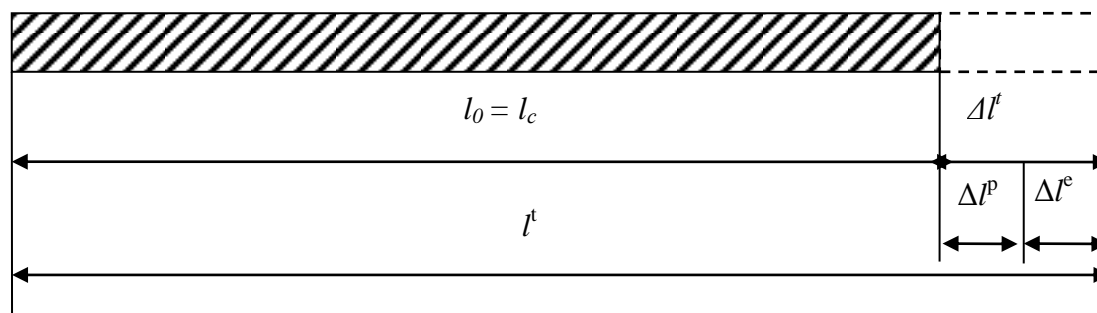


Рис. 3. Расчетная схема оценивания абсолютных деформаций:

l_0 – начальный размер (в ненагретом состоянии); l_c – конечный размер в условиях стеснения ($l_0 = l_c$); Δl^t – температурные деформации; Δl^p – пластическая составляющая деформации; Δl^e – упругая составляющая деформации

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛООБЛИЦОВКИ ГАЗОХОДОВ СТАРТОВОГО КОМПЛЕКСА

Основным результатом расчета напряженно-деформированного состояния металлооблицовки газоходов стартового комплекса является построение диаграмм «напряжение – деформация» конструкционного материала, в качестве которого использована сталь Ст3. Механические характеристики данной стали указаны в табл. 1.

Таблица 1

Механические характеристики стали Ст3 [5, 6]

Характеристика	Значение
Предел текучести металла при нормальных условиях	$\sigma_{0,2} = 220$ МПа;
Модуль упругости	$E = 2.08 \times 10^5$ МПа
Коэффициент Пуассона	$\mu = 0,3$
Коэффициент температурного расширения	$\alpha = 13 \times 10^{-6}$ 1/К;
Толщина покрывающего листа	$\delta = 0,04$ м
Относительные деформации после разрушения	$\varepsilon = 21\%$

Данные результаты расчета напряжений в процессе одного цикла термического воздействия представлены рис. 4 и 5.

На рис. 4,б представлен график зависимости относительной деформации от напряжений возникающих в термостесненном состоянии при нагреве металлооблицовки до $t = 100$ °С. В данном случае упругая деформация составила $\varepsilon^e = 13 \times 10^{-3} \%$. Необходимо отметить, что даже при такой низкой температуре нагрева, будет возникать пластическая деформация $\varepsilon^p = 5 \times 10^{-5} \%$.

На рис. 5,а представлен график зависимости относительной деформации от напряжений, возникающих в термостесненном состоянии при $t = 400$ °С. Упругая деформация в этом случае составила $\varepsilon^e \approx 1 \times 10^{-3} \%$, а пластическая деформация на этапе сжатия составила $\varepsilon^p \approx 4 \times 10^{-3} \%$, на этапе растяжения – $\varepsilon^p \approx 2 \times 10^{-3} \%$.

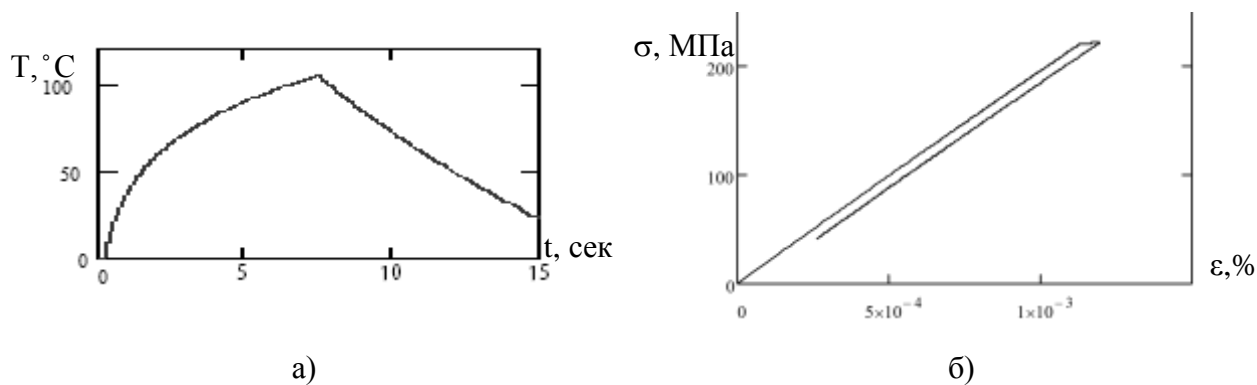


Рис. 4. График изменения температуры внутренней стенки металлооблицовки ($T_{max} 100^{\circ}C$) в зависимости от времени нагрева (а) и диаграмма «напряжение – деформация» при данном нагреве (б)

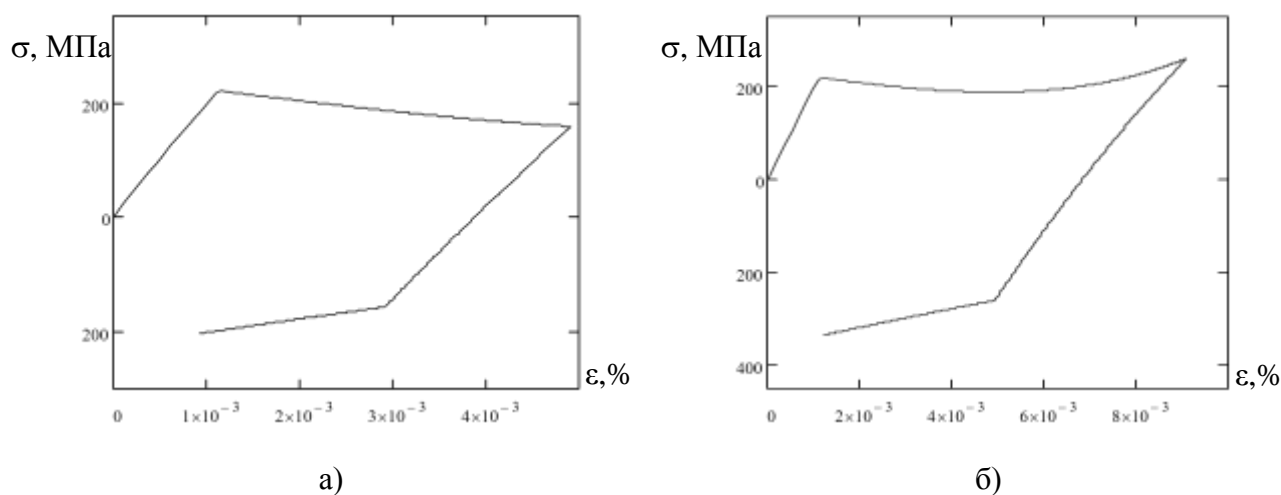


Рис. 5. Диаграмма «напряжение – деформация» при нагреве внутренней стенки до $400^{\circ}C$ (а) и $800^{\circ}C$ (б)

На рис. 5,б представлен график зависимости относительной деформации от напряжений, возникающих в термостесненном состоянии при $t = 800^{\circ}C$. Упругая деформация составила $\varepsilon^e \approx 1 \times 10^{-3}$, пластическая деформация на этапе сжатия составила $\varepsilon^p \approx 8 \times 10^{-3} \%$, а на этапе растяжения – $\varepsilon^p \approx 4 \times 10^{-3} \%$.

Представленные расчеты доказывают, что при неравномерном нагреве стенки газохода в результате температурного стеснения возникают напряжения, значения которых превышают предел текучести. Следствием этого является возникновение пластических деформаций, значение которых зависит от температуры нагрева. Суммарная пластическая деформация (с учетом сжатия и растяжения) может достигать $12 \times 10^{-3} \%$. В этих условиях, с учетом зависимости (1) и относительной деформацией после разрушения стали Ст3 (см. табл. 1) ресурс металлооблицовки будет составлять около 4×10^{-3} циклов при ее нагреве до $100^{\circ}C$, около 20 циклов при нагреве до $400^{\circ}C$. При нагреве металлооблицовки до $800^{\circ}C$ ее ресурс снижается до 10 циклов.

Полученные результаты хорошо согласуются с практикой эксплуатации металлооблицовок газоходов стартовых комплексов ракет-носителей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана математическая модель изменения напряженно-деформированного состояния металлооблицовки стартовых комплексов в условиях ее термоциклического нагружения (неравномерный прогрев по толщине) при пуске ракеты космического назначения. Показано, что даже при незначительном градиенте температур между внутренней и наружной стенками металлооблицовки в ней возникают знакопеременные пластические деформации. Рассчитано напряженно-деформированное состояние и определен ресурс металлооблицовки при различных уровнях ее нагрева при пуске ракеты-носителя.

Список используемых источников

1. Основы проектирования ракетно-космических комплексов. Методология обоснования облика комплексов / Г. Н. Бирюков [и др.]. – СПб.: Алфавит, 2002. – 395 с.
2. Основы эксплуатации космических средств / Е. С. Александров [и др.]. – СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2000. – 499 с.
3. Сивчиков Б. Е., Черноглазов С. В. Напряженное состояние коротких балок под действием ступенчатых нагрузок // Труды Военного инженерного Краснознаменного института имени А. Ф. Можайского. – 1982. – Вып. 598. – С. 14–17.
4. Самойлов Н. С., Самойлов А. Н. Ускоренные методы определения выносливости и термостойкости. – СПб.: НПО «Профессионал», 2012. – 324 с.
5. Золоторевский В. С. Механические испытания и свойства металлов. – М.: Metallurgia, 1974. – 304 с.
6. Завьялова Г. М., Лебедев Е. Л. Материаловедение: практикум. – СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2018. – 62 с.

А. С. Горянский*,
кандидат технических наук;
А. А. Карытко*,
кандидат технических наук;
Е. С. Карытко**

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

** В/ч 28289, Московская обл., г. Ногинск-9.

МЕТОДИКА КЛАССИФИКАЦИИ УГЛОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ФРАГМЕНТОВ ФУНКЦИИ БЛЕСКА

Представлены результаты исследования возможностей классификатора на базе одномерной сверточной искусственной нейронной сети, используемой для решения задачи распределения (классификации) оптических угловых измерений параметров траектории вновь запущенных или вновь образованных космических объектов, сформированных оптическими средствами мониторинга околоземного космического пространства. Предложена архитектура нейронной сети, реализующей классификатор, проведен вычислительный эксперимент, посвященный оценке качества результатов работы классификатора.

Ключевые слова: функция блеска космического объекта, одномерная сверточная искусственная нейронная сеть, угловые оптические измерения.

ВВЕДЕНИЕ

Основными источниками информации об объектах в околоземном космическом пространстве являются радиолокационные станции дальнего обнаружения, широкопольные и узкопольные оптические телескопы. Оптические телескопы формируют угловые измерения параметров траектории движения космических объектов (КО), включающие углы склонения, прямого восхождения, значения которых определены на заданный момент времени t , а также замеры соответствующей величины блеска объекта наблюдения. Наиболее целесообразно применять оптические телескопы для сбора информации о высокоорбитальных и геостационарных КО.

Расчет параметров опорных орбит для вновь обнаруженных КО на основе угловых измерений обеспечивается модернизированным методом Гаусса [1], точность результатов которого существенно зависит от длины триангуляционной базы, образуемой оптическими угловыми измерениями. Высокая точность результатов, формируемых данным методом достигается при обработке множества угловых измерений, образующих триангуляционную базу длиной свыше 180 градусов, и принадлежащих одному и тому же витку обращения КО вокруг Земли. Оптимальная длина триангуляционной базы как правило достигается при разнесении угловых измерений по одному КО во временном интервале равном 0,2 от периода обращения объекта наблюдения. При расчете параметров орбит ранее неизвестных КО, либо КО, по которым длительное время отсутствовали угловые измерения, требуемая длина триангуляционной базы обеспечивается комплексированием угловых измерений по одному КО от различных оптических телескопов. Как правило, в подобных случаях длительность наблюдения КО каждым телескопом в отдельности составляет не более 5 минут.

Указанные обстоятельства обуславливают высокую вычислительную сложность применяемого метода построения опорной орбиты по трем угловым измерениям ранее неизвестного КО в условиях высокой интенсивности фоноцелевого потока КО. Существенное влияние на вычислительную сложность оказывает комбинаторный характер решения задачи выбора троек угловых

измерений из множества измерений параметров траектории КО \mathbf{G} , сформированных совокупностью средств мониторинга околоземного космического пространства в течение ночи и неотожествленными с какими-либо известными КО. Естественным путем сокращения размерности задачи построения опорных орбит КО является селекция угловых измерений по некоординатным признакам – зависимости величины блеска КО от времени.

Селекцию угловых измерений предлагается осуществить на основе классификатора, развернутого на базе одномерной глубокой сверточной искусственной нейронной сети. Нейронная сеть обеспечивает распределение угловых измерений по группам $g_i \subseteq \mathbf{G}, i = \{1, \dots, n\}$, где n – число групп. Предполагается, что построение опорной орбиты КО целесообразно осуществлять на основе угловых измерений, принадлежащих одной группе. Сокращение мощности множества угловых измерений, используемых в качестве исходных данных для метода Гаусса, обеспечивает повышение оперативности решения задачи построения опорных орбит по данным угловых измерений от распределенной сети средств мониторинга околоземного космического пространства.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исходными данными решаемой задачи является множество $\mathbf{W} = \{\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_z\}$, где \mathbf{w}_i – множество реализаций функций блеска i -го КО, сформированных оптическими телескопами за всю историю наблюдений данного объекта. На основе элементов множества \mathbf{W} формируется таблица соответствия, содержащая строки следующего формата:

$$w_{ij}^t = \left\langle \left\{ w_i^t, w_i^{t+1}, \dots, w_i^{t+m} \right\}, k \right\rangle,$$

где $\{w_i^t, w_i^{t+1}, \dots, w_i^{t+m}\} \subseteq \mathbf{w}_i$ – подмножество результатов замеров блеска i -го КО в ходе j -й реализации на интервале времени длительностью m секунд, отсчитываемого от эпохи t , а k – класс принадлежности фрагмента кривой блеска в соответствии с заранее определенной классификацией. Важным ограничением, учитываемым в процедуре возможной классификации фрагментов блеска КО F , является выполнение условия принадлежности любых фрагментов функции блеска i -го КО к одному классу $\forall j, t \ F : w_{ij}^t \rightarrow k$.

Формируемая в соответствии с описанной выше процедурой таблица представляет собой обучающее множество для глубокой сверточной искусственной нейронной сети, реализующей целевую функцию данного исследования F . Функция F является кросс-энтропийной функцией потерь:

$$l(x, k) = L = \{l_1, \dots, l_N\}^T, \quad l_n = -\log \left(\frac{\exp(x_{n,k})}{\sum_{c=1}^C \exp(x_{n,c})} \right), \quad x_{n,k} = x_n \cdot v_k,$$

$$F = \min \sum_{n=1}^N l_n, \quad (1)$$

где $l(x, k)$ – функция потерь предсказаний классификатора F ;

x – подаваемая на вход классификатора какая-либо точка данных w_{ij}^t ;

k – истинный класс принадлежности данных x , используемых на этапе обучения нейронной сети;

N – мощность обучающего множества;

- v_k – вес (вероятность) принадлежности входных данных x к классу k , присвоенный нейронной сетью;
- C – число рассматриваемых в исследовании классов кривых блеска.

АРХИТЕКТУРА ИСКУССТВЕННОЙ ОДНОМЕРНОЙ СВЕРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ И ЕЕ ГИПЕРПАРАМЕТРЫ

Нейронная сеть синтезирована с использованием фреймворка *PyTorch* и состоит из пяти последовательных слоев. Первый и третий слой включают:

- одномерную сверточную сеть;
- нормализующий слой;
- слой *ReLU* активации.

Второй и четвертый слой дополнительно к слоям, перечисленным выше, включают так называемый слой пуллинга.

Пятый заключительный слой сети является линейным полносвязным слоем, транслирующим результаты свертки в меру принадлежности кривых блеска одному из классов объектов.

Подробные характеристики сверточных слоев, используемых в проводимом в рамках исследований вычислительном эксперименте, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики сверточных слоев искусственной нейронной сети

Номер слоя	Число каналов на входе	Число каналов на выходе	Размер ядра	Дополнение границ слоя
1	1	8	5	2
2	8	16	5	2
3	16	32	5	2
4	32	64	5	2

Для представленной в табл. 1 конфигурации сверточных слоев нейронной сети входная размерность линейного слоя составляет 960 нейронов, выходная размерность равна числу классов КО.

Основными гиперпараметрами нейронной сети являются:

- размер порции данных, используемых для накопления ошибки обучения при одном выполнении процедуры обратного прохода с целью коррекции весовых коэффициентов нейронной сети. В проводимом ниже вычислительном эксперименте параметр принимал значение 64;
- длина фрагмента кривой блеска КО, используемого для классификации КО-владельца измерений. В проводимом ниже вычислительном эксперименте параметр принимал значение 60;
- число эпох обучения нейронной сети. В проводимом ниже вычислительном эксперименте параметр принимал значение 600;
- скорость обучения нейронной сети. В проводимом ниже вычислительном эксперименте параметр принимал значение 10^{-6} .

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ И УСЛОВИЯ ЕГО ПРОВЕДЕНИЯ

Вычислительный эксперимент проводился в среде операционной системы *Debian 11 (bullseye)*, с использованием библиотеки *PyTorch* версии 1.11, языка программирования *Python* версии 3.9.5. Основным элементом аппаратного обеспечения являлась видеокарта *PNY Quadro RTX 4000 8GB*, обеспечивающая поддержку технологии *CUDA*.

В ходе предварительного анализа на основе методики, изложенной в работе [2], сформировано семнадцать возможных классов КО.

Процедура обучения нейронной сети осуществлялась согласно классическому алгоритму обучения с учителем, функция потерь классификации блеска нейронной сетью задавалась выражением (1). В процессе обучения использовалось два множества:

- 1) тренировочное (обучающее) множество;
- 2) тестовое (валидационное) множество.

В процессе формирования партий (батчей) данных, подаваемых на вход нейронной сети, выборка элементов из данных множеств осуществлялась в случайном порядке, при этом в ходе одной эпохи один элемент любого из множеств использовался единожды.

Итоговая мощность обучающего множества в вычислительном эксперименте составила 11547 фрагментов функций блеска КО, мощность валидационного множества составила 1615 фрагментов функций блеска КО. Длительность каждого фрагмента составляла 60 секунд. Типовые кривые блеска КО представлены на рис. 1.

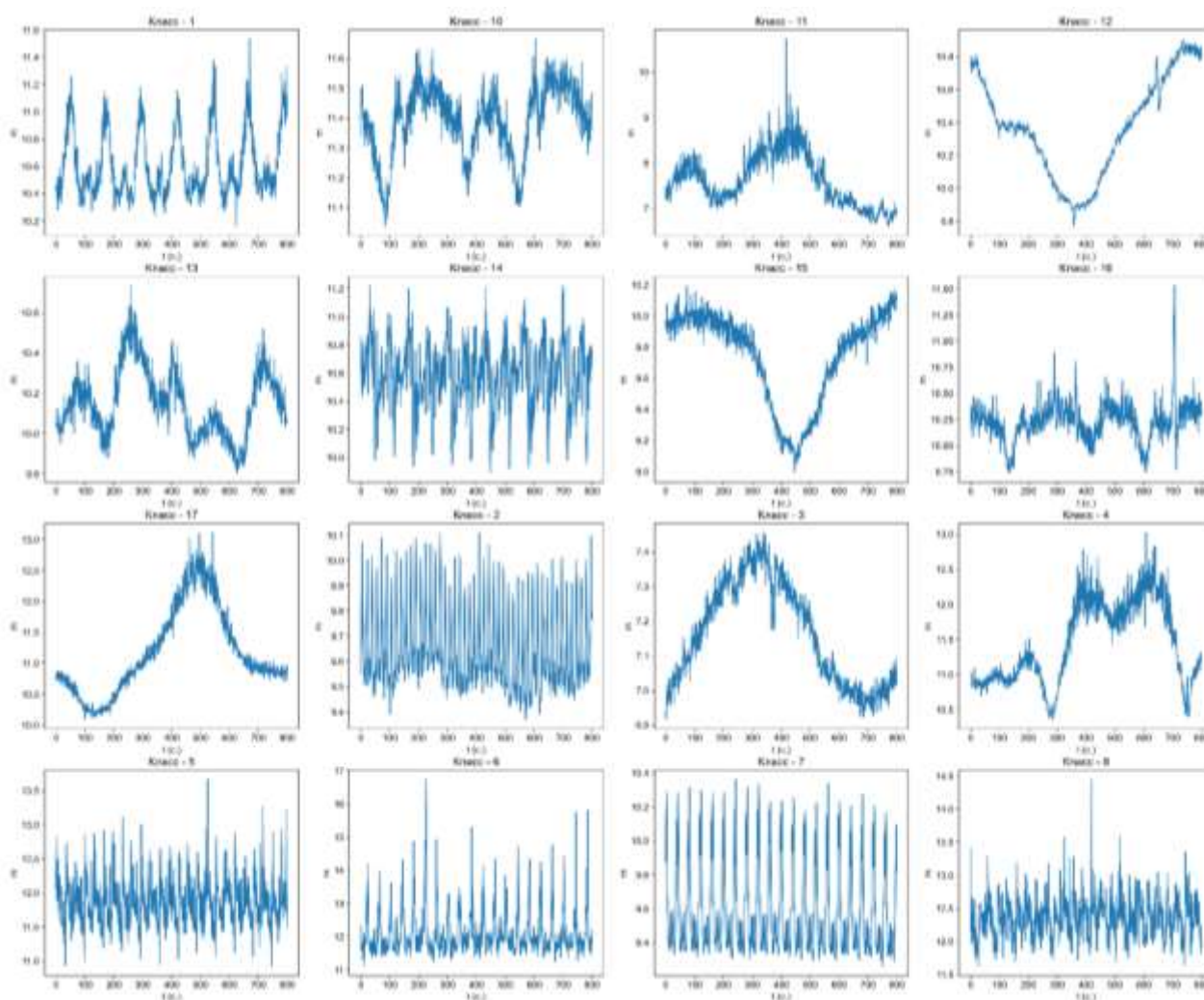


Рис. 1. Рассматриваемые в исследовании классы кривых блеска космических объектов (класс 9 на рисунке не представлен)

Фрагменты функций блеска предварительно нормировались в диапазоне возможных значений от 0 до 1. Критерием выбора рационального числа эпох обучения нейронной сети являлось прекращение уменьшения ошибки классификации нейронной сетью фрагментов функций блеска, извлекаемых из валидационного множества. Динамика величины ошибок классификации нейронной сетью на элементах тренировочного и валидационного множеств

представлена на рис. 2. В ходе исследования предпринимались попытки обучать нейронную сеть в течение 4000 эпох, при этом ошибка классификации тренировочных данных стремилась к нулю, в то время как величина ошибки классификации валидационных данных превышала величину аналогичной ошибки для сети, обученной в течение 600 эпох.

Итоговая оценка качества результатов, формируемых классификатором, осуществлялась с использованием так называемой матрицы ошибок M_e (в англоязычной литературе в сфере машинного обучения данная матрица известна также как *confusion matrix*, что дословно переводится на русский язык как матрица путаности).

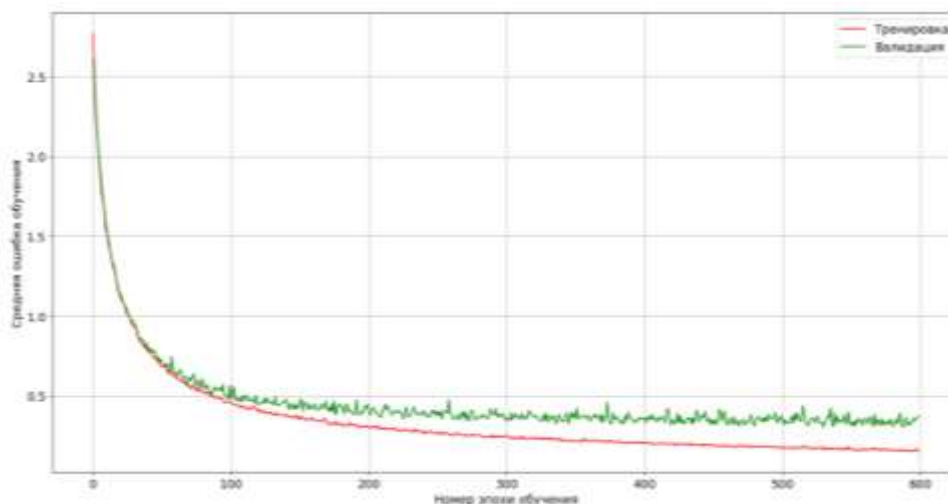


Рис. 2. Динамика ошибок классификации фрагментов блеска космических объектов для тренировочного и валидационного множеств

Номер столбца матрицы M_e соответствует истинному классу принадлежности фрагмента функции блеска, номер строки соответствует классу принадлежности фрагмента функции блеска КО, назначенному классификатором, т. е. нейронной сетью. Таким образом, идеальный классификатор должен формировать диагональную матрицу M_e . Матрицы ошибок (путаности) для тренировочного и валидационного множеств представлены на рис. 3.

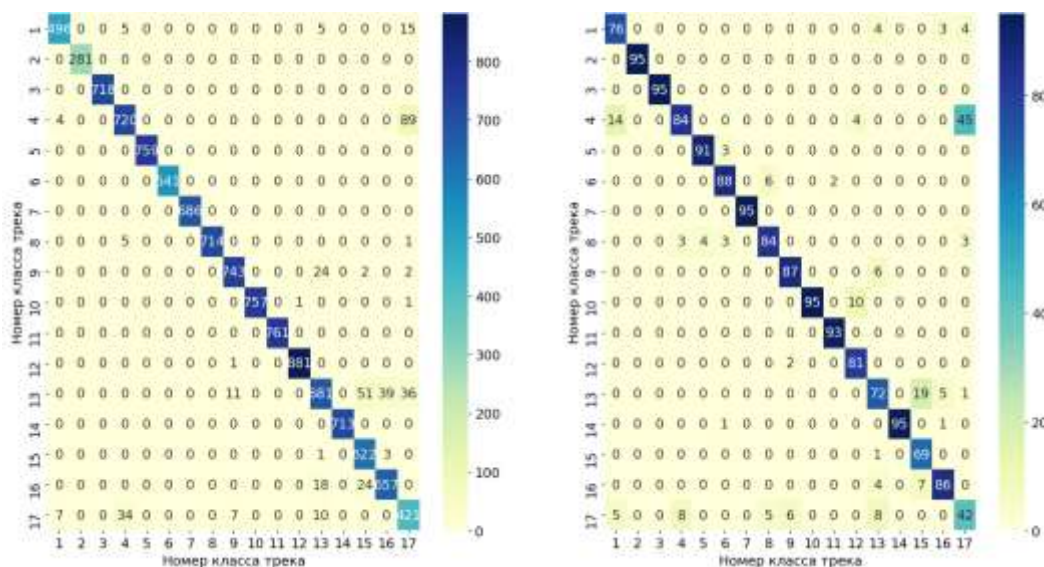


Рис. 3. Результаты классификации фрагментов блеска космических объектов тренировочного и валидационного множеств

Полученные результаты свидетельствуют практически о стопроцентной правильной классификации фрагментов кривых блеска за исключением четвертого и семнадцатого классов. Как показали дополнительные исследования увеличение длительности фрагментов кривых блеска КО до 120 с устраняет указанную ошибку классификации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования некоординатной информации, представленной в виде замеров блеска КО позволяют сделать следующие обоснованные выводы:

– предложенная и программно реализованная в рамках исследования архитектура нейронной сети способна обеспечить достоверную классификацию угловых измерений, что в перспективе позволит существенно снизить размерность исходных данных, используемых для решения задачи обнаружения орбит, вновь запущенных или вновь образованных космических объектов;

– представленная в работе классификация возможных кривых блеска не претендует на охват всех возможных реализаций кривых блеска космических объектов. Увеличение множества возможных классов будет способствовать необходимости использования тренировочных множеств, мощность которых на порядки превосходит мощность тренировочного множества, используемого в данной работе;

– увеличение мощности тренировочного множества и множества классов кривых блеска приведет к увеличению ресурсоемкости процесса обучения нейронной сети. Вместе с тем необходимо отметить, что в ходе выполнения вычислительного эксперимента время обучения нейронной сети на специализированном графическом процессоре, поддерживающем технологию *CUDA*, составило 11 минут для 600 эпох, время выполнения обучения нейронной сети на универсальном процессоре *Intel Xeon Silver 4210* составило 28 минут, что является не совсем характерным для процесса обучения нейронных сетей. Например, отношение времени обучения рекуррентных нейронных *LSTM*-сетей на графических и универсальных процессорах составляет до нескольких порядков. Таким образом, в связи с относительно небольшими размерами сверточных слоев, используемых рассмотренной нейронной сетью, становится возможным эффективное развертывание данной технологии на базе отечественной универсальной микропроцессорной архитектуры Эльбрус.

Практическое внедрение результатов исследований требует дополнительной модернизации и развития архитектуры нейронной сети в связи с необходимостью обеспечения учета влияния на значения функции блеска КО условий его наблюдения опико-электронным средством. Рассмотрению данного вопроса будут посвящены дальнейшие исследования, проводимые коллективом авторов.

Список используемых источников

1. *Самотохин А. С., Хуторовский З. Н.* Метод первоначального определения параметров околоземных орбит по трем угловым измерениям // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. – 2014. – № 044. – 31 с.
2. Модель изменения блеска космического объекта в ходе проводки оптическим наблюдательным средством / А. С. Горянский [и др.] // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2016. – Вып. 654. – С. 57–66.

Ю. Б. Калугин*,
доктор технических наук, профессор;

Ю. А. Спильник*,

* ВА МТО имени генерала армии А. В. Хрулёва, г. Санкт-Петербург.

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СОСТАВА ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО ПОЕЗДА

В статье рассматривается решение задачи формирования структуры и состава восстановительного поезда для ликвидации разрушений железнодорожного пути с использованием метода ветвей и границ. В результате сформированы варианты поезда по выбранным критериям оптимальности.

Ключевые слова: восстановление железных дорог, железнодорожный путь, восстановительный поезд, метод ветвей и границ.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования в области применения различных схем и способов организации восстановления разрушенных железнодорожных участков (объектов) [1–3] показали, что с увеличением числа разрушенных объектов и с одновременным увеличением расстояния между ними, эффективно применение схемы с использованием передвижного восстановительного подразделения на железнодорожном ходу – восстановительного поезда.

В работах [4–6] реализованы различные подходы к созданию мобильных специализированных подразделений. Современное состояние теории и практики выработки и реализации плановых решений позволяет эффективно использовать для этих целей метод ветвей и границ [7].

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СОСТАВА ПО КРИТЕРИЮ ВРЕМЕНИ

Сущность метода ветвей и границ заключается в последовательном переборе вариантов, рассмотрении лишь тех из них, которые по определенным признакам оказываются перспективными, и отбрасывании бесперспективных вариантов.

Важнейшим этапом при решении задачи методом ветвей и границ является определение оценки перспективности дальнейшего ветвления (в данном случае нижней границы). Значение нижней границы будет эквивалентно предельно возможной минимальной продолжительности выполнения работ.

Нижняя граница вычисления оценок перспективности на k -м процессе (шаге) определяется с помощью выражения

$$q^k = \min q_j^k \quad (1)$$

где k – рассматриваемый процесс (шаг);

j – переменная способов (техники) для выполнения работ.

При этом оценка перспективности на k -м процессе (шаге) для j -способа выполнения работ определяется по формуле

$$q_j^k = \sum_{i=1}^{k-1} \min t_i + t_{kj} + \sum_{i=k+1}^m \min_{j=1:n} t_{ij} \quad (2)$$

- где $\sum_{i=1}^{k-1} \min t_i$ – суммарная минимальная продолжительность выполнения работ на предыдущих процессах (шагах);
- t_{kj} – продолжительность выполнения работ различными способами j для k -го процесса (шага);
- $\sum_{i=k+1}^m \min t_{ij}$ – сумма минимальных продолжительностей выполнения работ на последующих процессах (начиная с $k+1$) вплоть до последнего m -го;
- i – переменная от 1 до m ;
- n – общее количество рассматриваемых способов для k -го процесса;
- m – общее количество процессов (шагов).

К дальнейшему развитию принимается подмножество, имеющее минимальное значение q^k .

В условиях существенного влияния дестабилизирующих факторов на ход строительно-восстановительных работ [8–11] формирование восстановительного поезда по критерию минимальной продолжительности является особенно актуально.

Общий комплекс работ по ликвидации разрушений железнодорожного пути предполагает небольшие по объему работы и включает следующие процессы:

- выдвигание и доставку строительно-восстановительных материалов к месту выполнения работ;
- расчистку пути от завалов подвижного состава;
- восстановление земляного полотна (в небольших объемах);
- укладку элементов пути;
- дозировку балласта в путь (в небольших объемах).

При оценке процессов восстановления учитывался средний объем работ для одного участка, на котором разрушено 3-4 объекта железнодорожного пути вследствие подрывов минами малой мощности. Имеются завалы разрушенного подвижного состава нескольких грузовых вагонов, сошедших с рельсов обеими тележками, а также принято среднее расстояние до объекта выполнения работ в 120 км.

Параметры для расчета продолжительности выполнения работ представлены в табл. 1.

Таблица 1

Значения t_{ij} для формирования состава и структуры восстановительного поезда, ч

№ п/п	Наименование процессов организации восстановления железнодорожного пути восстановительным поездом	Способы выполнения работ техническими средствами							
		ТЭМ18 ДМ	ТЭМ28	КЖ-662	КЖ-1572	ДСТ УРАЛ D12	ДСТ УРАЛ D20	С пом. тяги локомотива	С пом. мех. инструмента
1	Доставка техники и строительно-восстановительных материалов к месту выполнения работ	3	2,5	–	–	–	–	–	–
2	Расчистка пути от завалов подвижного состава	–	–	14	6,5	3	3,5	3	–
3	Восстановление земляного полотна (в небольших объемах)	–	–	0,5	1	2	2,5	–	4
4	Укладка элементов пути	–	–	0,5	1	–	–	–	3
5	Засыпка балласта в путь (в небольших объемах)	–	–	0,5	1	–	–	–	4

Для условий, представленных в табл. 1, дерево формирования структуры и состава восстановительного поезда на первом этапе показано на рис. 1, где в числителе значений отображается t_{kj} , а в знаменателе – q_j^k .

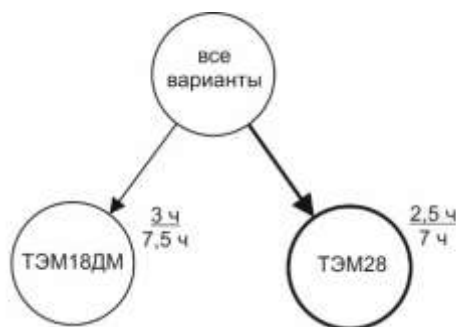


Рис. 1. Фрагмент дерева формирования структуры и состава восстановительного поезда (выбор подмножества)

На k -м шаге выбранного множества формируются подмножества, конечное число которых соответствует способам выполнения второго процесса восстановительных работ по расчистке пути от завалов подвижного состава за соответствующее время. Для каждого подмножества на основании выражения (2) вычисляются оценки перспективности его дальнейшего развития (q^k). К дальнейшему развитию принимается подмножество, имеющее минимальное значение q^k (рис. 2).

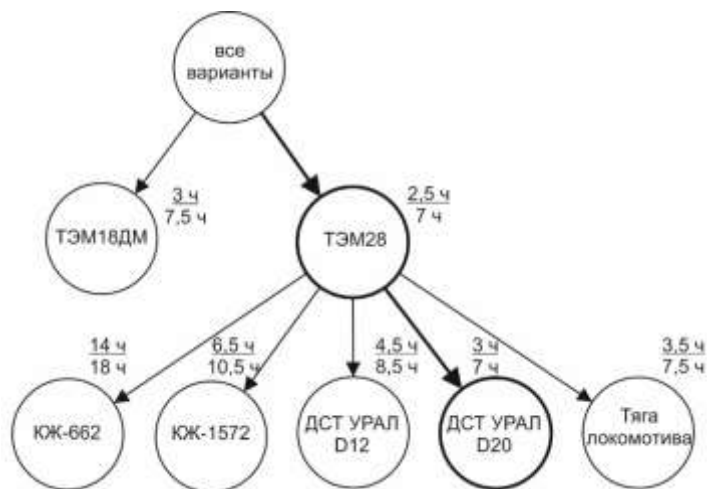


Рис. 2. Фрагмент дерева формирования структуры и состава восстановительного поезда (второй шаг)

Далее, аналогичным образом, последовательность действий выполняется вплоть до выбора наиболее эффективного способа (техники) на последнем процессе.

Фрагмент дерева формирования структуры и состава восстановительного поезда с оптимальным маршрутом по критерию минимума времени представлен на рис. 3.

Время на выполнение общего комплекса работ по ликвидации подрывов железнодорожного пути составило 7 часов. В результате определены структура и состав восстановительного поезда по критерию минимума времени для заданных условий выполнения задачи:

- маневровый локомотив серии ТЭМ28 – 1 ед.;
- бульдозер ДСТ УРАЛ D20 (412 л.с.) – 1 ед.;
- железнодорожный кран КЖ-662 (г/п 32 т) – 1 ед.

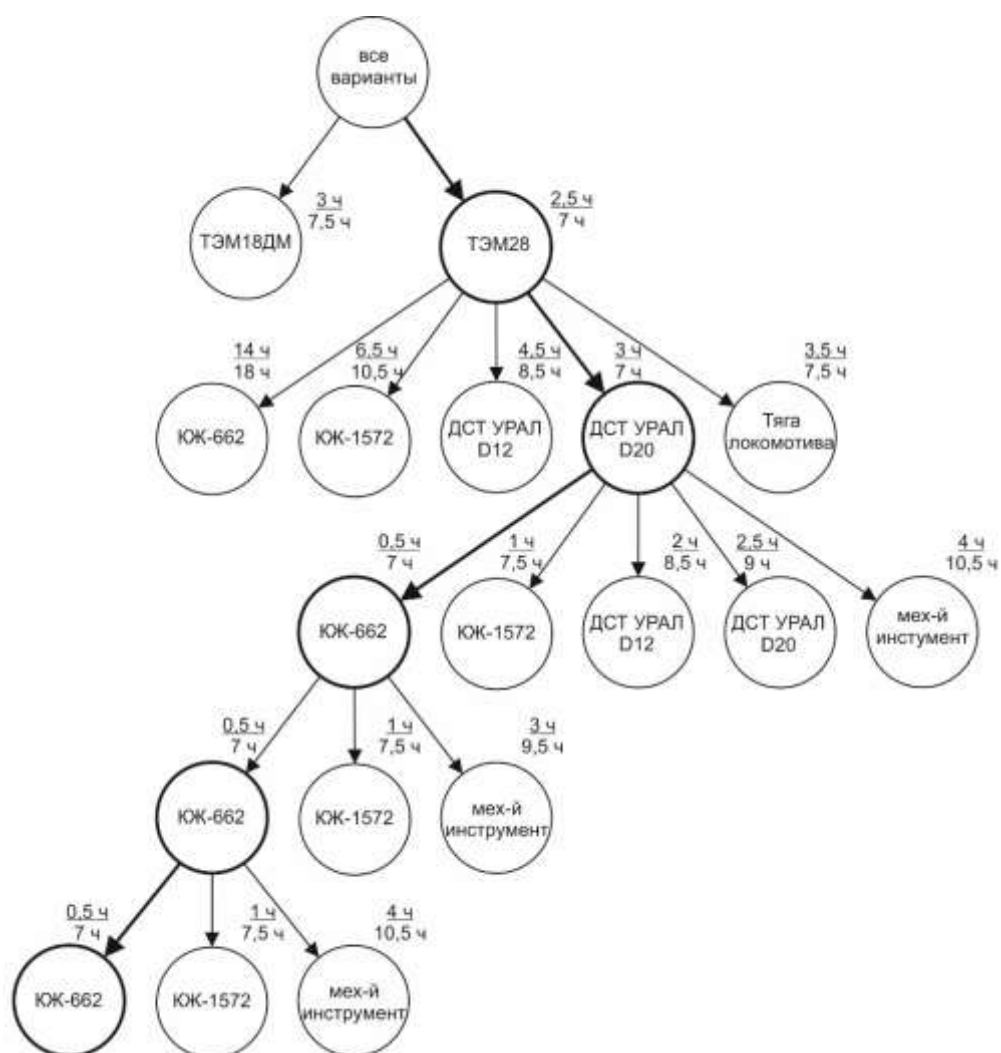


Рис. 3. Фрагмент дерева формирования структуры и состава восстановительного поезда с оптимальным маршрутом по критерию минимума времени

Использование метода ветвей и границ при формировании структуры и состава восстановительного поезда позволило найти оптимальный вариант, где оценкой перспективности являлся критерий минимум времени на выполнение общего комплекса организации восстановительных работ.

Результаты были получены для условий полного двудольного графа, когда все смежные процессы согласуются между собой, однако если ряд связей между соседними вершинами отсутствует, это не гарантирует выбор минимального значения в целом. В этой связи решение задачи возможно реализовать с использованием метода динамического программирования.

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СОСТАВА ПО КРИТЕРИЮ ЗАТРАТ

Помимо временных критериев, которые будут являться основными оценками перспективности при формировании, важно учитывать и стоимостные затраты.

На каждом этапе производится выбор оптимального способа выполнения работ, вплоть до минимально затратного на последнем процессе. Вычисление нижних границ на k -м процессе (шаге) определяется с помощью выражения

$$q^k = \min q_j^k \quad (3)$$

где k – рассматриваемый процесс (шаг);

j – переменная способов для включения в структуру.

В свою очередь, возможные затраты на формирование состава на k -м процессе (шаге) для j -способа определяется по формуле:

$$q_j^k = \sum_{i=1}^{k-1} \min c_i + c_{kj} + \sum_{i=k+1}^m \min c_{ij}, \quad (4)$$

где $\sum_{i=1}^{k-1} \min c_i$ – сумма минимальных затрат на предыдущих процессах (шагах);

c_{kj} – стоимость каждого способа j для k -го процесса (шага);

$\sum_{i=k+1}^m \min c_{ij}$ – сумма минимальных затрат на последующих процессах (начиная с $k+1$) вплоть до последнего m -го;

i – переменная от 1 до m ;

n – общее количество рассматриваемых способов для k -го процесса;

m – общее количество процессов (шагов).

Вместе с тем затраты на один и тот же способ, выбранный на определенном этапе и используемый на последующих, в расчетах не учитываются.

Параметры для расчета стоимостных затрат на формирование восстановительного поезда представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значения c_{ij} для формирования структуры и состава восстановительного поезда, млн. руб.

№ п/п	Наименование процессов организации восстановления железнодорожного пути восстановительным поездом	Способы выполнения работ техническими средствами							
		ТЭМ18 ДМ	ТЭМ28	КЖ-662	КЖ-1572	ДСТ УРАЛ D12	ДСТ УРАЛ D20	С пом. тяги локомотива	С пом. мех. инструмента
1	Доставка техники и строительно-восстановительных материалов к месту выполнения работ	145	178	-	-	-	-	-	-
2	Расчистка пути от завалов подвижного состава	-	-	31	149	12	23	4	-
3	Восстановление земляного полотна (в небольших объемах)	-	-	31	149	12	23	-	1
4	Укладка элементов пути	-	-	31	149	-	-	-	1
5	Засыпка балласта в путь (в небольших объемах)	-	-	31	149	-	-	-	1

Фрагмент дерева формирования структуры и состава восстановительного поезда с оптимальным маршрутом по критерию минимума затрат на его создание и функционирование представлен на рис. 4.

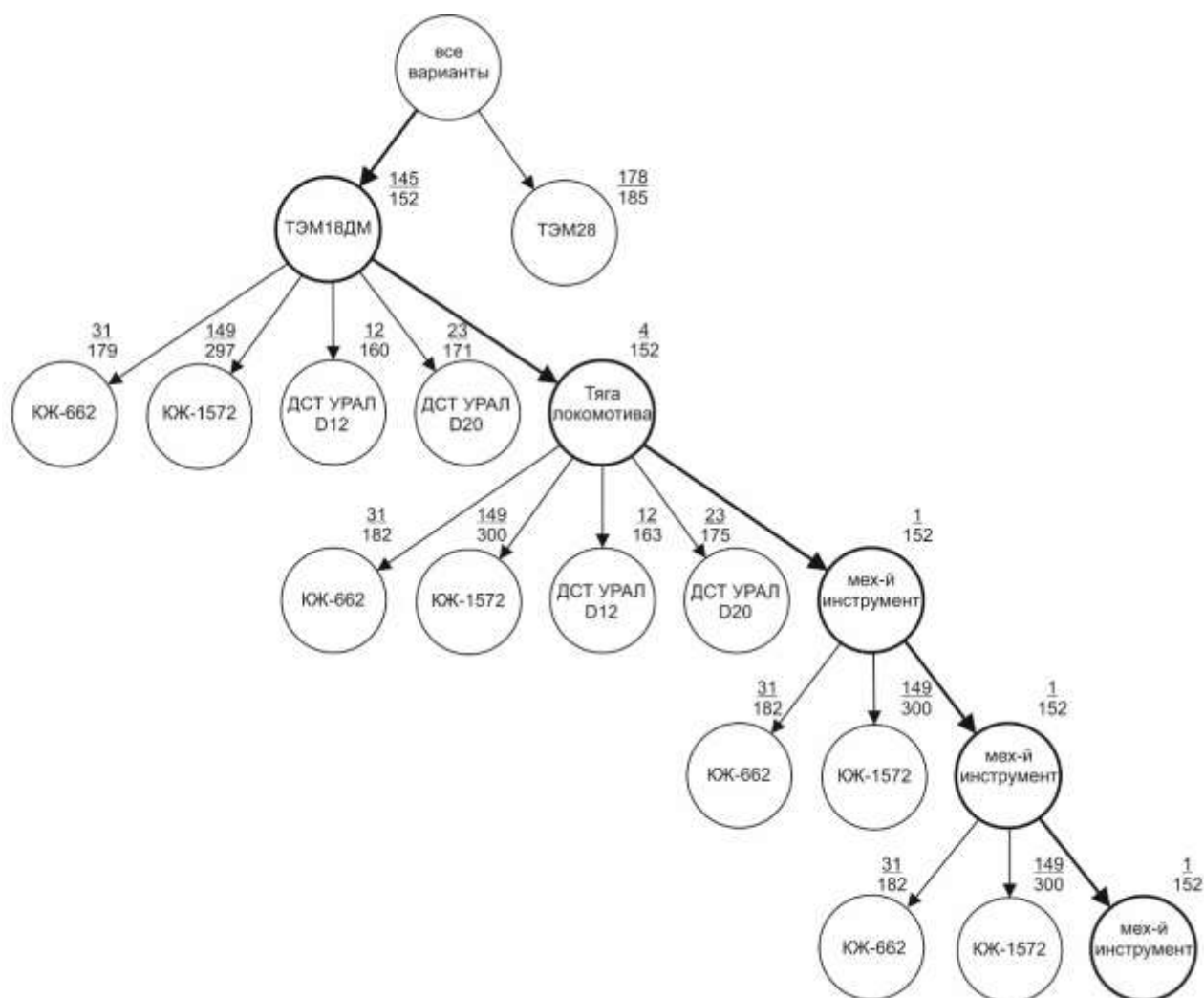


Рис. 4. Фрагмент дерева формирования структуры и состава восстановительного поезда с оптимальным маршрутом по критерию минимума затрат

Таким образом, в результате получена оптимальная структура восстановительного поезда, где оценкой перспективности явился критерий минимума затрат:

- доставка материальных средств осуществляется маневровым локомотивом серии ТЭМ18ДМ – 1 ед.;
- расчистка железнодорожного пути от завалов производится с помощью троса, якорных приспособлений и тяги локомотива;
- восстановление земляного полотна производится с помощью механизированного инструмента (вибротрамбовки, тележки строительные, лопаты);
- укладка элементов пути осуществляется с помощью механизированного инструмента (клещи рельсовые, клещи для шпал, костыльные молотки, ключи путевые);
- балластировка пути производится также с помощью механизированного инструмента (электрошпалоподбойки, лопаты, ломы).

Сопоставление данной структуры с результатами, полученными в задаче формирования по критерию минимума времени на восстановление железнодорожного пути, показывает, что они имеют разнонаправленный характер. В этой связи необходимо рассматривать задачу формирования поезда с использованием комплексного критерия, учитывающего и время, и затраты.

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СОСТАВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЛЕКСНОГО КРИТЕРИЯ

Сущность комплексного критерия заключается в сведении нескольких критериев путем образования суммарного монопоказателя. При этом для учета разной значимости критериев вводятся весовые коэффициенты.

В этих условиях комплексный критерий может быть представлен в виде аддитивной (линейной) свертки. Линейная свертка комплексного показателя формируется по следующей формуле [12, 13]:

$$K_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \alpha^i K^i, \text{ если } \sum_{i=1}^n \alpha^i = 1 \text{ и } \alpha \geq 0 \text{ (} i = 1, \dots, n \text{)}, \quad (5)$$

где α^i – коэффициент значимости i -го критерия;

K^i – частный i -й критерий.

В данном случае при сведении двух критериев (времени на восстановление объектов и затрат на формирование структуры) выражение будет иметь вид

$$K_{kj} = \alpha^1 K_{kj}^1 + \alpha^2 K_{kj}^2, \text{ при этом } K_1 = \frac{t_{kj}}{T^*}, K_2 = \frac{c_{kj}}{C^*}, \quad (6)$$

где K_{kj} – комплексный показатель, оценивающий перспективность развития дальнейшего ветвления дерева формирования;

t_{kj} – продолжительность выполнения способа j на k -м процессе;

T^* – минимальная продолжительность выполнения всех работ сформированной структурой по критерию минимума времени;

c_{kj} – затраты на выполнение способа j на k -м процессе;

C^* – минимальные затраты на формирование структуры и состава восстановительного поезда.

В случае, когда коэффициенты значимости равны между собой (в условиях мирного времени), дерево формирования восстановительного поезда будет иметь вид, показанный на рис. 5.

В случае, когда критерий затрат на формирование поезда менее важен, чем критерий времени на восстановление (например, в условиях военного времени, при $\alpha_1 = 0,8$ и $\alpha_2 = 0,2$) дерево будет иметь вид, показанный на рис. 6.

Таким образом, сформированы структура и состава восстановительного поезда, где оценкой перспективности явился комплексный критерий. Анализ дерева показывает, что данная структура совпадает с деревом формирования по критерию минимума времени на выполнение восстановительных работ.

Блок-схема методики формирования структуры и состава восстановительного поезда представлена на рис. 7.

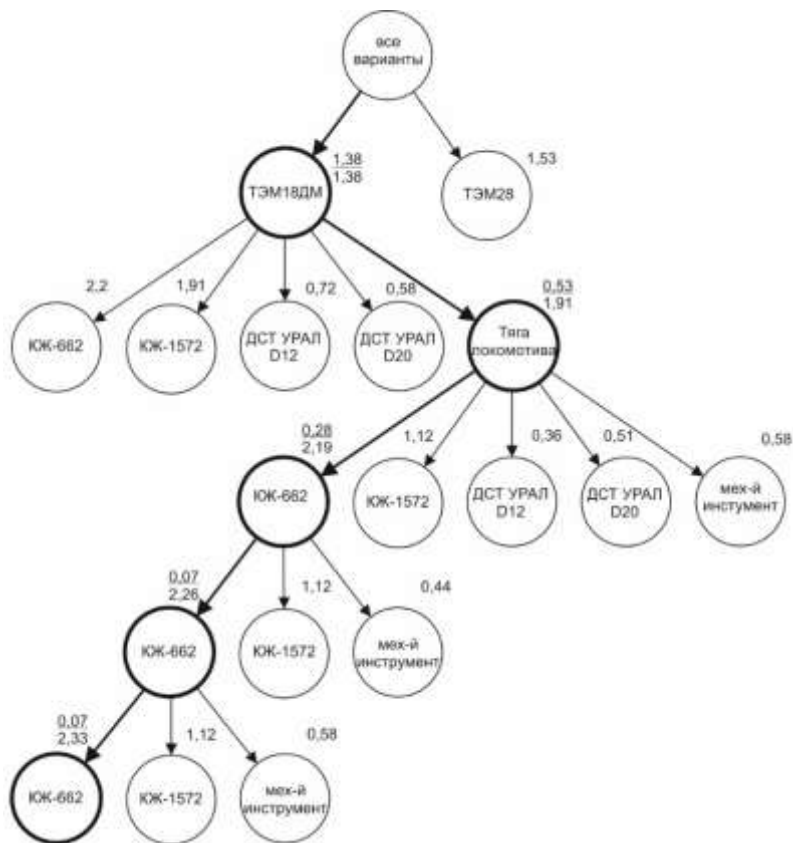


Рис. 5. Фрагмент дерева формирования структуры и состава восстановительного поезда с оптимальным маршрутом по комплексному критерию

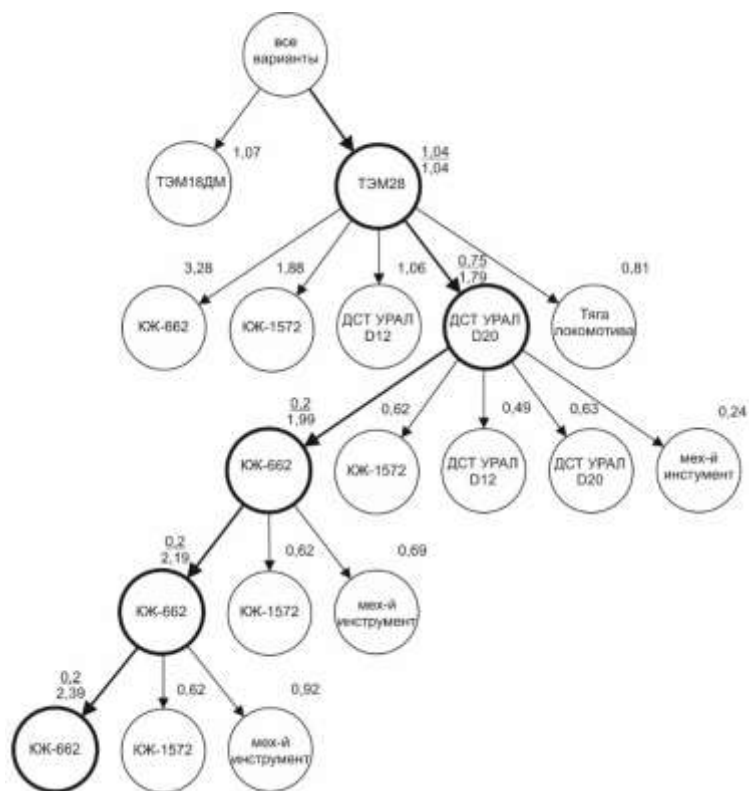


Рис. 6. Фрагмент дерева формирования восстановительного поезда с оптимальным маршрутом по комплексному критерию

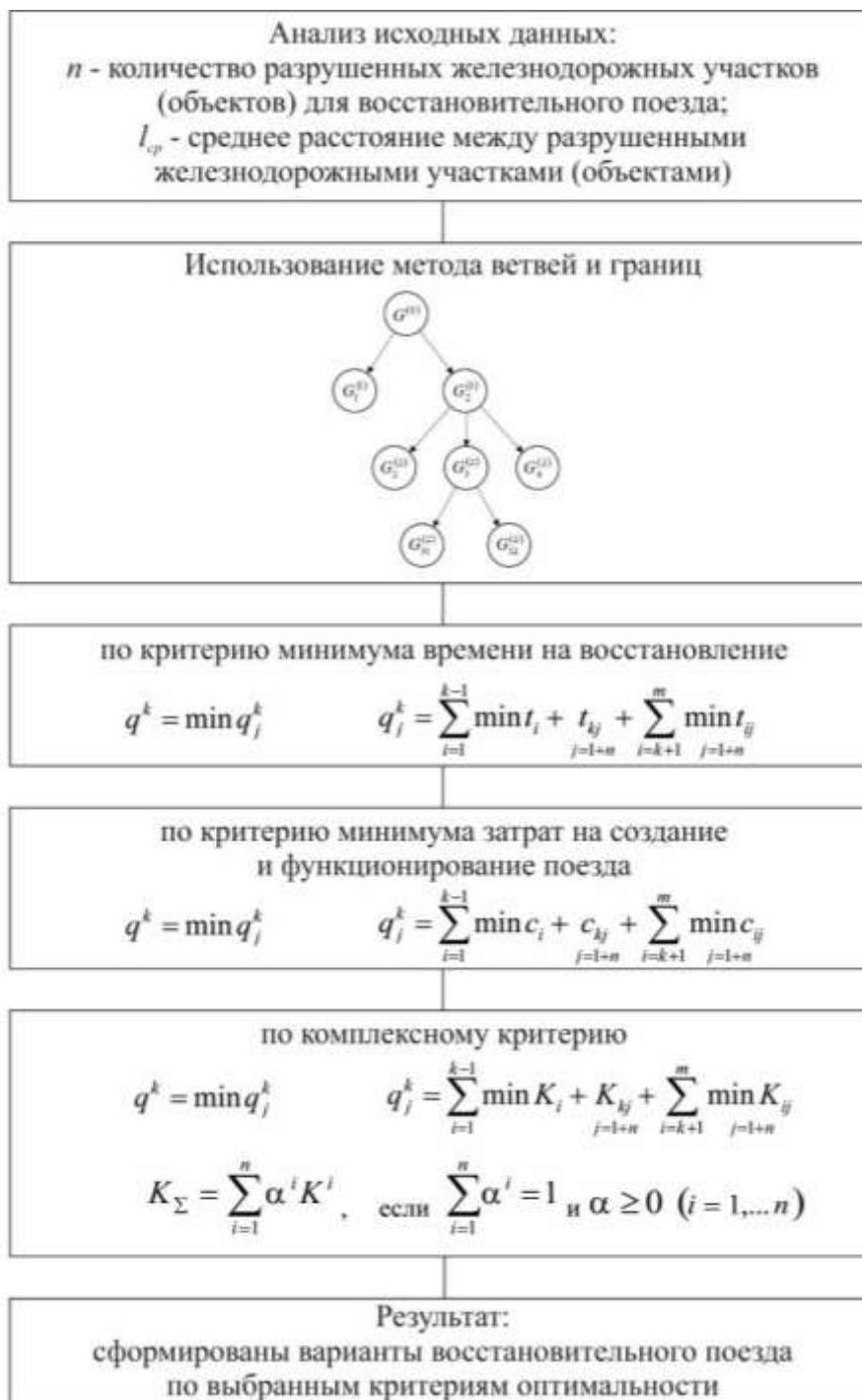


Рис. 7. Блок-схема методики формирования структуры и состава восстановительного поезда

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях воздействия вероятного противника на железнодорожные участки (объекты), возникает задача восстановления железнодорожного пути, которая может быть эффективно решена с помощью восстановительного поезда.

Полученные результаты показали эффективность применения метода ветвей и границ в рамках решения задачи формирования структуры и состава восстановительного поезда, где

оценкой перспективности явились: критерий минимума времени на выполнение работ, критерий стоимостных затрат на создание и функционирование поезда, а также комплексный критерий на основе весовых коэффициентов стоимостных и временных затрат.

Разработанная методика позволяет формировать рациональные структуры восстановительного поезда для восстановления сквозного движения поездов на разрушенных участках железнодорожного пути.

Список используемых источников

1. *Калугин Ю. Б., Спильник Ю. А., Тимошенко Д. Н.* Обоснование способов восстановления верхнего строения пути // *Специальная техника и технологии транспорта: сб. науч. ст.* – 2021. – № 10. – С. 21–32.
2. *Калугин Ю. Б.* Оценка организационно-технологических схем восстановления верхнего строения пути на перегонах // *Специальная техника и технологии транспорта: сб. науч. ст.* – 2020. – № 7 (45). – С. 58–63.
3. *Калугин Ю. Б., Спильник Ю. А.* Задача распределения участков (объектов) по подразделениям (способам организации восстановления) // *Специальная техника и технологии транспорта: сб. науч. ст.* – 2021. – № 11. – С. 83–90.
4. *Тумаринсон Н. С.* Передвижные домостроительные предприятия // *Транспортное строительство.* – 1961. – № 4. – С. 30–32.
5. *Васильев В. В.* Организация строительства зданий передвижными строительными формированиями при сооружении железных дорог: дис. ... канд. техн. наук. – М., 1967. – 21 с.
6. *Абрамсон Л.* Мобильное предприятие монолитного домостроения // *На стройках России.* – 1985. – № 8. – С. 16–18.
7. *Зайченко Ю. П.* Исследование операций. – Киев: Высш. шк., 1975. – 320 с.
8. *Калугин Ю. Б.* Расчет вероятностных параметров параллельных работ // *Известия вузов. Строительство.* – 2011. – № 6 (618). – С. 35–42.
9. *Калугин Ю. Б.* Календарное планирование работ с вероятностными временными параметрами в иерархических структурах // *Известия вузов. Строительство.* – 2012. – № 10 (646). – С. 30–39.
10. *Калугин Ю. Б.* Сущность календарного планирования работ с вероятностными временными параметрами // *Известия вузов. Строительство.* – 2013. – № 9 (657). – С. 92–106.
11. *Строительство железных дорог: учеб. пособие для ж.-д. вузов / В. И. Грицык [и др.].* – М., 1999. – 384 с.
12. *Джонс Дж. К.* Методы проектирования: пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 326 с.
13. *Кини Р. Л., Райфа Х.* Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения : пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1981. – 560 с.

К. А. Крупский,
кандидат технических наук, доцент;
Н. В. Радионов,
доктор экономических наук, профессор,
кандидат технических наук;
А. И. Ратушняк,
кандидат технических наук, доцент

МЕТОДИКА ОБЕСПЕЧЕНИЯ СХОДИМОСТИ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ЛАМБЕРТА В ЗАДАЧАХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОРБИТ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ПО ДВУМ ИЗМЕРЕНИЯМ

В задачах определения орбит по двум измеренным положениям космического объекта рассмотрена проблема обеспечения сходимости итерационной процедуры решения уравнения Ламберта за счет выбора начального приближения. В качестве одного из возможных подходов к теоретическому обоснованию выбора начального приближения в итерационных процедурах предлагается получение аналитического решения упрощенного уравнения Ламберта на основе разложения функций в ряд.

Ключевые слова: уравнение Ламберта, поиск начального приближения, аналитическое решение, сходимость итерационной процедуры.

ВВЕДЕНИЕ

В задачах определения и исследования орбит важное значение имеет уравнение Ламберта [1], связывающее два последовательных по времени положения космического объекта, движущегося в гравитационном поле по невозмущенной орбите. С этой задачей в ее современном понимании астрономы столкнулись еще в XVI веке, когда было окончательно доказано, что кометы являются небесными телами и возник вопрос об определении их орбит. В настоящее время решение уравнения Ламберта часто используется для поиска начального приближения в различного рода навигационных задачах космической баллистики, когда реальное движение космических объектов отличается от идеального кеплеровского. При этом даже при несущественных отличиях реального и идеального движений отличие измеренных радиусов векторов положения космического объекта от большой полуоси невозмущенной орбиты оказывается настолько критическим, что прямое использование измеренных величин в качестве начального приближения приводит к расходимости итерационного процесса поиска решения уравнения. В данной статье в результате более тщательного анализа уравнения Ламберта общего вида предпринимается попытка расчета такого начального значения большой полуоси невозмущенной орбиты, которая позволяет обеспечить сходимость решения уравнения Ламберта при любых условиях измерения радиусов векторов.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть в последовательные моменты времени t_1 , t_2 известны радиусы-векторы \bar{R}_1 и \bar{R}_2 положения космического объекта в системе координат, связанной с притягивающим центром, движущегося в гравитационном поле. Предполагая, что движение происходит по невозмущенной орбите, можно записать следующее уравнение:

$$\sqrt{\mu} \cdot (t_2 - t_1) = a^{\frac{3}{2}} \cdot [\varepsilon_{12} - \sin \varepsilon_{12} \mp (\delta_{12} - \sin \delta_{12})], \quad (1)$$

где μ – гравитационная постоянная притягивающего центра;

a – большая полуось невозмущенной орбиты.

При этом следует учесть, что

$$\sin^2 \frac{\varepsilon_{12}}{2} = \frac{|\bar{R}_1| + |\bar{R}_2| + |\bar{R}_1 - \bar{R}_2|}{4 \cdot a};$$

$$\sin^2 \frac{\delta_{12}}{2} = \frac{|\bar{R}_1| + |\bar{R}_2| - |\bar{R}_1 - \bar{R}_2|}{4 \cdot a}.$$

Данное уравнение принято называть уравнением Ламберта (в некоторых источниках – Эйлера – Ламберта [2]). Знак минус в выражении (1) выбирается при угле между \bar{R}_1 и \bar{R}_2 меньше 180° , в противном случае выбирается знак плюс.

Преобразовав в уравнении Ламберта (1) некоторые элементы в правой части, можно получить следующее выражение, например для разности угла и его синуса:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{12} - \sin \varepsilon_{12} &= 2 \cdot \left[\operatorname{arctg} \sqrt{\frac{\sin^2 \frac{\varepsilon_{12}}{2}}{1 - \sin^2 \frac{\varepsilon_{12}}{2}}} - \sqrt{\sin^2 \frac{\varepsilon_{12}}{2} \cdot \left(1 - \sin^2 \frac{\varepsilon_{12}}{2}\right)} \right] = \\ &= 2 \cdot \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{|\bar{R}_1| + |\bar{R}_2| + |\bar{R}_1 - \bar{R}_2|}{4 \cdot a - (|\bar{R}_1| + |\bar{R}_2| + |\bar{R}_1 - \bar{R}_2|)}} - \\ &\quad - \frac{1}{2 \cdot a} \cdot \sqrt{(|\bar{R}_1| + |\bar{R}_2| + |\bar{R}_1 - \bar{R}_2|) \cdot [4 \cdot a - (|\bar{R}_1| + |\bar{R}_2| + |\bar{R}_1 - \bar{R}_2|)]}. \end{aligned}$$

Аналогичное выражение получается и для другой пары угла и синуса:

$$\begin{aligned} \delta_{12} - \sin \delta_{12} &= 2 \cdot \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{|\bar{R}_1| + |\bar{R}_2| - |\bar{R}_1 - \bar{R}_2|}{4 \cdot a - (|\bar{R}_1| + |\bar{R}_2| - |\bar{R}_1 - \bar{R}_2|)}} - \\ &\quad - \frac{1}{2 \cdot a} \cdot \sqrt{(|\bar{R}_1| + |\bar{R}_2| - |\bar{R}_1 - \bar{R}_2|) \cdot [4 \cdot a - (|\bar{R}_1| + |\bar{R}_2| - |\bar{R}_1 - \bar{R}_2|)]}. \end{aligned}$$

Введем обозначения:

$$X_{12} = |\bar{R}_1| + |\bar{R}_2| + |\bar{R}_1 - \bar{R}_2|; \quad Y_{12} = |\bar{R}_1| + |\bar{R}_2| - |\bar{R}_1 - \bar{R}_2|.$$

С учетом этих обозначений и выполненных выше преобразований уравнение Ламберта можно представить в универсальной форме:

$$\begin{aligned} F_{12}(\alpha) &= \frac{\xi \cdot (t_2 - t_1)}{\alpha^3} - \operatorname{arctg} \frac{1}{\sqrt{4 \cdot \frac{\alpha^2}{X_{12}} - 1}} + \operatorname{arctg} \frac{1}{\sqrt{4 \cdot \frac{\alpha^2}{Y_{12}} - 1}} + \\ &\quad + \frac{X_{12}}{4 \cdot \alpha^2} \cdot \sqrt{\left(4 \cdot \frac{\alpha^2}{X_{12}} - 1\right)} - \frac{Y_{12}}{4 \cdot \alpha^2} \cdot \sqrt{\left(4 \cdot \frac{\alpha^2}{Y_{12}} - 1\right)} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$\xi = \frac{\sqrt{\mu}}{2}; \quad \alpha = \sqrt{a}.$$

Трансцендентный вид данного уравнения позволяет решать его только итерационным методом последовательных приближений. Обычно для этого можно воспользоваться методом Ньютона [3]:

$$\alpha_{j+1} = \alpha_j - \frac{F(\alpha_j)}{\partial F / \partial \alpha|_{\alpha_j}}, \quad j = 0, 1, 2, \dots, \quad (3)$$

где α_0 – начальное приближение.

Для получения формулы производной в знаменателе этого выражения можно воспользоваться соотношениями:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \alpha} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{X_{12}}{4 \cdot \alpha^2 - X_{12}}} &= -\frac{1}{\alpha} \cdot \sqrt{\frac{X_{12}}{4 \cdot \alpha^2 - X_{12}}}; \\ \frac{\partial}{\partial \alpha} \sqrt{X_{12} \cdot (4 \cdot \alpha^2 - X_{12})} &= 4 \cdot \alpha \cdot \sqrt{\frac{X_{12}}{4 \cdot \alpha^2 - X_{12}}}. \end{aligned}$$

В результате формула производной функции $F_{12}(\alpha)$ примет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial F_{12}(\alpha)}{\partial \alpha} &= -\frac{1}{\sqrt{\mu}} \cdot \left[6 \cdot \alpha^2 \cdot \left(\operatorname{arctg} \sqrt{\frac{X_{12}}{4 \cdot \alpha^2 - X_{12}}} - \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{Y_{12}}{4 \cdot \alpha^2 - Y_{12}}} \right) - \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{2} \cdot \left(\sqrt{X_{12} \cdot (4 \cdot \alpha^2 - X_{12})} - \sqrt{Y_{12} \cdot (4 \cdot \alpha^2 - Y_{12})} \right) - \right. \\ &\quad \left. - 4 \cdot \alpha^2 \cdot \left(\sqrt{\frac{X_{12}}{4 \cdot \alpha^2 - X_{12}}} - \sqrt{\frac{Y_{12}}{4 \cdot \alpha^2 - Y_{12}}} \right) \right]. \end{aligned}$$

С учетом возможности приближенного разностного вычисления производной

$$\partial F / \partial \alpha|_{\alpha_j} \approx \frac{F(\alpha_j) - F(\alpha_{j-1})}{\alpha_j - \alpha_{j-1}}$$

итерационная формула (3) примет вид более простой с вычислительной точки зрения:

$$\alpha_{j+1} = \frac{F(\alpha_j) \cdot \alpha_{j-1} - F(\alpha_{j-1}) \cdot \alpha_j}{F(\alpha_j) - F(\alpha_{j-1})}, \quad j = 1, 2, \dots,$$

где в качестве начальной и «разгонной» точек можно выбрать, например $\alpha_1 = 1,03 \cdot \alpha_0$. Однако во всех случаях применения метода Ньютона необходимо найти такое начальное приближение α_0 , которое расположено внутри интервала сходимости итерационной процедуры.

Практика конкретных расчетов показала, что для околокруговых орбит с эксцентриситетом до 0,1 свойством сходимости почти всегда обладает величина $\alpha_0 = (|\bar{R}_1| + |\bar{R}_2|) / 2$. Однако с увеличением эксцентриситета свойство данной величины теряется. Поэтому для обеспечения устойчивости итерационной процедуры необходимо теоретическое обоснование выбора начального приближения. Далее в качестве одного из возможных подходов рассматривается использование аналитического решения упрощенного уравнения Ламберта.

РАСЧЕТ НАЧАЛЬНОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ ДЛЯ ИТЕРАЦИОННОГО ПРОЦЕССА РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ЛАМБЕРТА

Примем следующие обозначения:

$$m = \frac{\chi}{2 \cdot a^{\frac{1}{2}}}; \quad \chi = \sqrt{X_{12}}.$$

Тогда можно получить следующие разложения в ряд Тейлора:

$$\begin{aligned} \frac{\varepsilon}{2} &= \arcsin m = m + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n-1)!!}{(2n)!!} \cdot \frac{m^{2n+1}}{2n+1} = \\ &= m + \frac{1}{2} \cdot \frac{m^3}{3} + \frac{1}{2} \cdot \frac{3}{4} \cdot \frac{m^5}{5} + \frac{1}{2} \cdot \frac{3}{4} \cdot \frac{5}{6} \cdot \frac{m^7}{7} + \frac{1}{2} \cdot \frac{3}{4} \cdot \frac{5}{6} \cdot \frac{7}{8} \cdot \frac{m^9}{9} + \frac{1}{2} \cdot \frac{3}{4} \cdot \frac{5}{6} \cdot \frac{7}{8} \cdot \frac{9}{10} \cdot \frac{m^{11}}{11} + \dots = \\ &= m + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2^3} \cdot \frac{\chi^3}{3} \cdot \frac{1}{a^{\frac{3}{2}}} + \frac{1}{2} \cdot \frac{3}{4} \cdot \frac{1}{2^5} \cdot \frac{\chi^5}{5} \cdot \frac{1}{a^{\frac{5}{2}}} + \frac{1}{2} \cdot \frac{3}{4} \cdot \frac{5}{6} \cdot \frac{1}{2^7} \cdot \frac{\chi^7}{7} \cdot \frac{1}{a^{\frac{7}{2}}} + \\ &+ \frac{1}{2} \cdot \frac{3}{4} \cdot \frac{5}{6} \cdot \frac{7}{8} \cdot \frac{1}{2^9} \cdot \frac{\chi^9}{9} \cdot \frac{1}{a^{\frac{9}{2}}} + \frac{1}{2} \cdot \frac{3}{4} \cdot \frac{5}{6} \cdot \frac{7}{8} \cdot \frac{9}{10} \cdot \frac{1}{2^{11}} \cdot \frac{\chi^{11}}{11} \cdot \frac{1}{a^{\frac{11}{2}}} + \dots; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\sin \varepsilon}{2} &= m \sqrt{1-m^2} = m - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n)!}{(2n-1)(n!)^2 2^{2n}} m^{2n+1} = \\ &= m - \frac{1}{2} \cdot m^3 - \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{4} \cdot m^5 - \frac{1}{2} \cdot \frac{3}{4} \cdot \frac{1}{6} \cdot m^7 - \frac{1}{2} \cdot \frac{3}{4} \cdot \frac{5}{6} \cdot \frac{1}{8} \cdot m^9 - \frac{1}{2} \cdot \frac{3}{4} \cdot \frac{5}{6} \cdot \frac{7}{8} \cdot \frac{1}{10} m^{11} + \dots = \\ &= m - \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2^3} \cdot \chi^3 \cdot \frac{1}{a^{\frac{3}{2}}} - \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{2^5} \cdot \chi^5 \cdot \frac{1}{a^{\frac{5}{2}}} - \frac{1}{2} \cdot \frac{3}{4} \cdot \frac{1}{6} \cdot \frac{1}{2^7} \cdot \chi^7 \cdot \frac{1}{a^{\frac{7}{2}}} - \\ &- \frac{1}{2} \cdot \frac{3}{4} \cdot \frac{5}{6} \cdot \frac{1}{8} \cdot \frac{1}{2^9} \cdot \chi^9 \cdot \frac{1}{a^{\frac{9}{2}}} - \frac{1}{2} \cdot \frac{3}{4} \cdot \frac{5}{6} \cdot \frac{7}{8} \cdot \frac{1}{10} \cdot \frac{1}{2^{11}} \cdot \chi^{11} \cdot \frac{1}{a^{\frac{11}{2}}} + \dots \end{aligned}$$

Здесь знак факториала (!!) означает выбор последовательных чисел «через одно».

Для частичных рядов можно получить следующее приближенное равенство:

$$\begin{aligned} \varepsilon - \sin \varepsilon &= 2 \cdot \left(\frac{\varepsilon}{2} - \frac{\sin \varepsilon}{2} \right) \approx \\ &\approx 4 \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot \frac{1}{2^3} \cdot \chi^3 \cdot \frac{1}{a^{\frac{3}{2}}} + \frac{1}{5} \cdot \frac{1}{2^6} \cdot \chi^5 \cdot \frac{1}{a^{\frac{5}{2}}} + \frac{3}{7} \cdot \frac{1}{2^{10}} \cdot \chi^7 \cdot \frac{1}{a^{\frac{7}{2}}} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{5}{9} \cdot \frac{1}{2^{13}} \cdot \chi^9 \cdot \frac{1}{a^{\frac{9}{2}}} + \frac{5 \cdot 7}{11} \cdot \frac{1}{2^{18}} \cdot \chi^{11} \cdot \frac{1}{a^{\frac{11}{2}}} \right). \end{aligned}$$

В точности аналогичное выражение можно получить и для частичной суммы разложения в ряд величины $\delta - \sin \delta$ лишь изменив обозначение:

$$\chi = \sqrt{Y_{12}}.$$

Следовательно, уравнение Ламберта может быть заменено приближенным уравнением (с учетом частичной суммы ряда):

$$\begin{aligned} \xi \cdot (t_2 - t_1) \approx & \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{2^3} \cdot M_3 + \frac{1}{5} \cdot \frac{1}{2^6} \cdot M_5 \cdot \frac{1}{a} + \frac{3}{7} \cdot \frac{1}{2^{10}} \cdot M_7 \cdot \frac{1}{a^2} + \\ & + \frac{5}{9} \cdot \frac{1}{2^{13}} \cdot M_9 \cdot \frac{1}{a^3} + \frac{5 \cdot 7}{11} \cdot \frac{1}{2^{18}} \cdot M_{11} \cdot \frac{1}{a^4} \end{aligned} \quad (4)$$

где

$$M_j = (\sqrt{X_{12}})^j - (\sqrt{Y_{12}})^j, j = 3, 5, 7, 9, 11.$$

Записанное в виде бесконечной суммы ряда данное уравнение принято называть уравнением Эйлера. В общем виде это уравнение не имеет аналитического решения. В представленном виде частичной суммы уравнение Эйлера имеет 4-ю степень и, следовательно, аналитическое решение. Однако при этом возникает вопрос выбора из четырех его корней. Если же сократить частичную сумму в уравнении Эйлера до второй степени величины $1/a$, то данное уравнение превращается в квадратное. Причем в этом случае уравнение имеет единственное решение либо для эллиптической, либо для гиперболической орбиты в зависимости от выбора знака в знаменателе:

$$a_{02} = \frac{\frac{3}{112} \cdot M_7}{-\frac{1}{10} \cdot M_5 \pm \sqrt{\frac{1}{100} \cdot (M_5)^2 - \frac{3}{7} \cdot M_7 \cdot \left(\frac{1}{6} \cdot M_3 - \sqrt{\mu} \cdot (t_2 - t_1)\right)}}, \quad (5)$$

Величина (5) может служить показателем выбора однозначного решения уравнения 4-й степени (4) и таким образом обеспечивать надежную сходимость итерационной процедуры (3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исходя из проделанного анализа можно представить следующую методику решения уравнения Ламберта, надежно обеспечивающую сходимость к однозначному решению.

Шаг 1. Расчет предварительного начального приближения a_{02} по формуле (5).

Шаг 2. Расчет корней уравнения (4) $a_{04}(i)$, $i = 1, \dots, 4$ и выбор из действительных корней единственного начального приближения $a_{04} = \min_i |a_{04}(i) - a_{02}|$.

Шаг 3. Получение окончательного решения уравнения Ламберта из начального приближения $\alpha_0 = \sqrt{a_{04}}$ с помощью итерационной процедуры (3).

Для надежного выполнения предложенного алгоритма на втором шаге необходимо также учитывать порядок величин коэффициентов уравнения (4). Проведенные численные исследования показали, что вместо решения уравнения (4) с вычислительной точки зрения лучше решать его аналог, который получается делением на величину $\psi = \left[\frac{1}{3} \cdot \frac{1}{2^3} \cdot M_3 - \xi \cdot (t_2 - t_1) \right] / a^4$. В результате приведенное уравнение 4-й степени приобретает вид

$$a^4 + \frac{1}{\psi} \cdot \frac{1}{5} \cdot \frac{1}{2^6} \cdot M_5 \cdot a^3 + \frac{1}{\psi} \cdot \frac{3}{7} \cdot \frac{1}{2^{10}} \cdot M_7 \cdot a^2 + \frac{1}{\psi} \cdot \frac{5}{9} \cdot \frac{1}{2^{13}} \cdot M_9 \cdot a + \frac{1}{\psi} \cdot \frac{5 \cdot 7}{11} \cdot \frac{1}{2^{18}} \cdot M_{11} = 0.$$

Проведенные авторами исследования для различных эллиптических орбит высотой от 200 км до 40000 км с эксцентриситетом от 0 до 0,9 показали, что точность вычисления начального приближения большой полуоси предложенной методикой не превышает 3% истинного значения большой полуоси расчетной орбиты.

Список используемых источников

1. *Субботин М. Ф.* Введение в теоретическую астрономию. – М.: Наука, 1968. – 800 с.
2. *Эльясберг П. Е.* Введение в теорию полета искусственных спутников Земли. – М., 1965. – 540 с.
3. *Ортега Дж., Рейнболдт В.* Итерационные методы решения нелинейных систем уравнений со многими неизвестными: пер. с англ. – М.: Мир, 1975. – 558 с.
4. Обобщенная модель измерительной информации в системах телеметрии реального времени / В. А. Каргин [и др.] // Труды Международной научно-практической конф. «Передовые информационные технологии, средства и системы автоматизации и их внедрение на российских предприятиях». АИТА-2011, Москва, 4–8 апреля 2011 г. – М.: ИПУ им. В. А. Трапезникова РАН, 2011. – С. 781–789.

И. О. Кукушкин*,

кандидат технических наук, доцент;

В. М. Лизан*;

А. А. Пушкарев**,

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

** в/ч 26178, Московская обл., г. Щелково.

ОЦЕНИВАНИЕ СТЕПЕНИ КРИТИЧНОСТИ ОТКАЗОВ ЭЛЕМЕНТОВ СЛОЖНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ КОСМИЧЕСКОГО РАКЕТНОГО КОМПЛЕКСА

Представлены результаты исследования по оцениванию степени критичности отказов элементов сложных технических систем космического ракетного комплекса. Описан алгоритм расчета показателя степени критичности при неполной информации об элементах. Разработана методика, позволяющая учитывать вклад отдельных подсистем с различным числом элементов в безопасность функционирования оборудования.

Ключевые слова: космический ракетный комплекс, сложная техническая система, критичность отказов, неисправность.

ВВЕДЕНИЕ

Своевременность восполнения и наращивания орбитальной группировки космических аппаратов военного и двойного назначения во многом определяется состоянием средств выведения, основу которых составляют космические ракетные комплексы (КРК). Космический ракетный комплекс создается на основе ракеты-носителя конкретного типа и функционально взаимосвязанных технических средств, сооружений и коммуникаций.

В состав технических средств космических ракетных комплексов входят технологическое оборудование, технические системы, вспомогательное оборудование.

Технологическое оборудование непосредственно участвует в подготовке к пуску и пуске ракеты-носителя (ракеты космического назначения), а технические системы и вспомогательное оборудование обеспечивают условия выполнения технологического процесса.

Системы и агрегаты технологического оборудования стартовых и технических комплексов КРК, как правило, являются сложными техническими системами (СТС), в состав которых входит различное количество подсистем. В процессе эксплуатации состояние средств выведения изменяется, в том числе изменяется техническое состояние систем и агрегатов технологического оборудования, что может оказать влияние на своевременность выполнения поставленных задач и безопасность функционирования космических средств.

Работоспособность технологического оборудования КРК характеризуется установленной в эксплуатационно-конструкторской документации совокупностью значений параметров, описывающих состояние объектов, и качественных признаков, для которых не применяются количественные оценки. Причинами переходов объектов из одного состояния в другое являются повреждения и отказы элементов оборудования.

Поддержание технического состояния обеспечивается своевременным техническим обслуживанием и ремонтом (ТО и Р). Выбор методики управления ТО и Р во многом связан с возможностью предупреждения отказов и выделения элементов, оказывающих существенное влияние на работоспособность системы (подсистемы). Поэтому оценивание степени критичности элементов является актуальной задачей.

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ОЦЕНИВАНИЯ СТЕПЕНИ КРИТИЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ СЛОЖНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

В настоящее время в ракетно-космической отрасли решаются задачи перехода от планово-предупредительной системы ТО и Р к техническому обслуживанию и ремонту по состоянию. Такой переход возможен при непрерывном или периодическом мониторинге параметров функционирования оборудования. В силу большого числа параметров, требующих контроля, невысокой достоверности контроля и прогноза параметров, сложности оборудования для контроля и высокой стоимости, полный переход к обслуживанию по состоянию считается невозможным [1]. Поэтому реализуется смешанный подход.

К числу перспективных методик управления ТО и Р относится методика *RCM (Reliability-Centered Maintenance)*, реализующая техническое обслуживание, направленное на обеспечение безотказности (или надежностно-ориентированное ТО) [2]. Эта методика предполагает проведение анализа оборудования, выделение известных или возможных отказов, что позволяет определять сроки и очередность работ для технического обслуживания.

В нормативно-технических документах по надежности, безопасности и техническому обслуживанию предлагаются методики для менеджмента риска и определения критичных элементов, основанные на анализе дерева неисправностей [3], анализе видов и последствий отказов [4]. В этих методиках определяются цели анализа и описываются процедуры анализа. В [3] для построения дерева неисправностей предполагается использование знаний экспертов-аналитиков. Качественную оценку влияния элементов на появление опасных событий аналитики формируют на основе логического анализа дерева, а для количественного оценивания предлагается использовать вероятностные данные. В [4] указано, что для оценки последствий или критичности отказов должна быть известна частота или вероятность появления каждого вида отказа.

Возникновение и развитие опасных ситуаций при эксплуатации технологического оборудования РКК характеризуются комбинацией случайных событий, возникающих с различной частотой на разных этапах функционирования. Для выявления причинно-следственных связей между этими событиями целесообразно применение логико-вероятностных методов анализа и оценивания безопасности функционирования. Анализ научно-технической литературы, посвященной решению задач определения перечня элементов строго неопределенного множества, показывает, что наибольшее распространение в данной области получили методы эвристических рассуждений и различные комбинаторные методы. При этом качество применения комбинаторных методов полностью основывается на глубине знаний объекта исследования и возможности корректного математического описания решаемой задачи. Практика решения подобных задач показывает, что эвристические методы существенно проигрывают комбинаторным методам, так как степень субъективности в них значительно выше.

В рамках решаемой задачи целесообразно использовать модифицированный метод морфологического анализа. Тогда алгоритм оценки безопасности функционирования агрегата (системы) технологического оборудования будет включать следующие этапы:

- анализ процесса функционирования агрегата (системы);
- морфологический анализ безопасности процесса функционирования агрегата (системы);
- оценивание результатов морфологического анализа.

Основные этапы морфологического анализа представлены на рис. 1.

Использование таких этапов морфологического анализа позволяет перейти к количественному оцениванию его результатов с использованием аппарата логико-вероятностного исчисления. В этом случае аналитическое описание сценария возникновения происшествия осуществляется с помощью функции опасности системы, аргументами которой являются инициирующие события и условия, приводящие к развитию опасной ситуации [5].

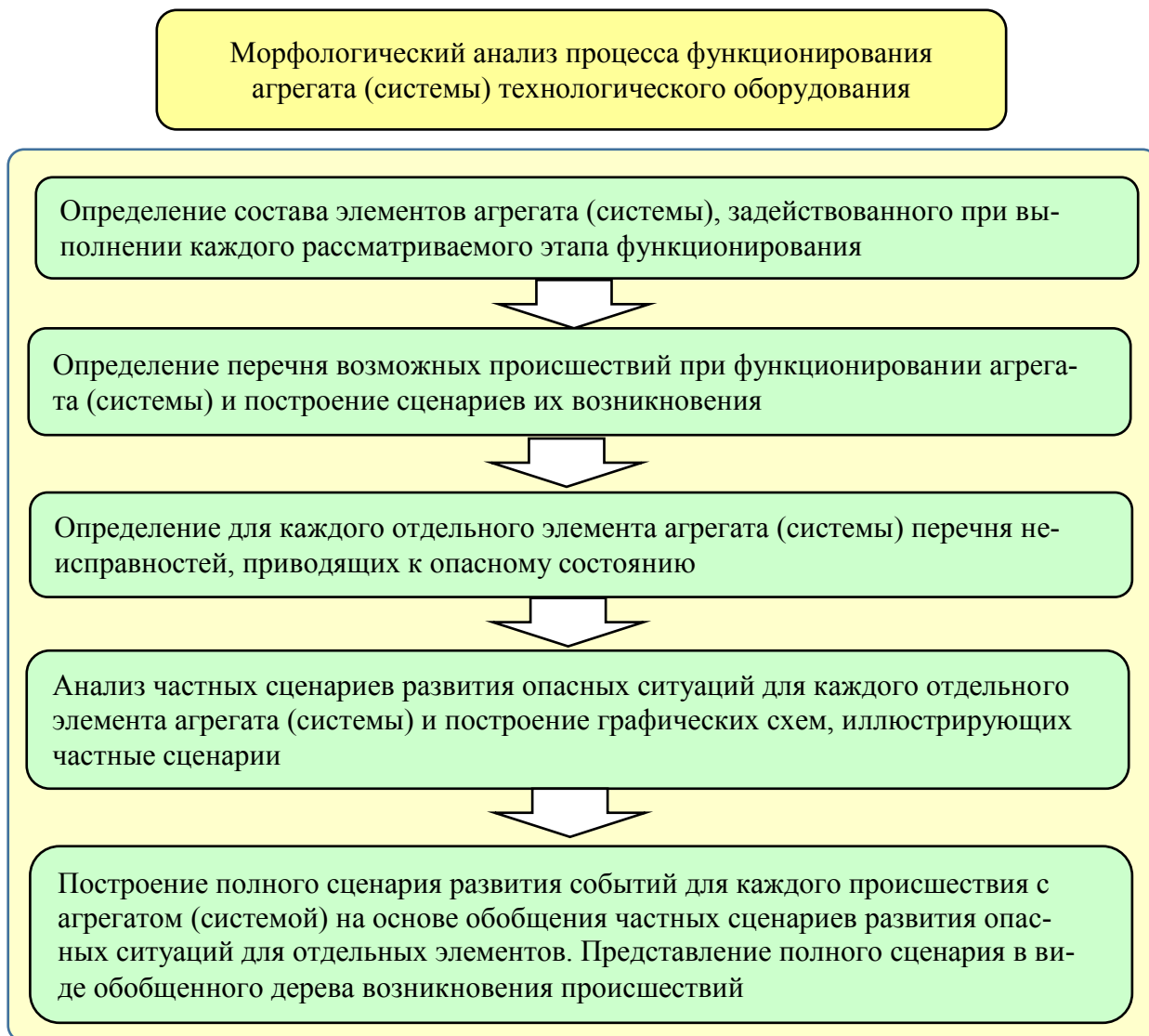


Рис. 1. Этапы морфологического анализа

Функция опасности системы составляется в виде функции алгебры логики с помощью кратчайших путей опасного функционирования (КПОФ). Каждый кратчайший путь опасного функционирования описывает один из вариантов попадания системы в опасное состояние с помощью минимального набора инициирующих событий. Математически КПОФ записывается в виде конъюнкции соответствующих инициирующих событий:

$$\Phi_l = \bigwedge_{i \in K_{\Phi_l}} z_i,$$

где K_{Φ_l} – множество номеров инициирующих событий, соответствующих l -му КПОФ;
 z_i – i -е инициирующее событие, которое может принимать одно из двух значений (1 – если событие произошло, 0 – если событие не произошло).

Так как реальная техническая система имеет конечное число КПОФ, каждое из которых может привести к происшествию, то функцию опасности системы можно записать в виде дизъюнкции всех имеющихся кратчайших путей опасного функционирования:

$$y(z_1, z_2, \dots, z_m) = \bigvee_{l=1}^d \Phi_l = \bigvee_{l=1}^d \left(\bigwedge_{i \in K_{\Phi_l}} z_i \right),$$

где m – число инициирующих событий;
 d – число КПОФ.

Если опасность инициирующих событий задана (известна), например в виде вероятности случайных событий, то для количественной оценки используется аппарат теории надежности. Технологическое оборудование РКК изготавливается, как правило, в единичных экземплярах, так как сбор статистики не позволяет получить обоснованные значения вероятностных характеристик функционирования элементов оборудования. Поэтому существует проблема получения количественной оценки результатов морфологического анализа.

Если не известны исходные вероятности опасности каждого из инициирующих событий, то для определения значимости инициирующих событий могут использоваться специальные методы. Использование формально-топологического или функционально-топологического методов не всегда возможно из-за определенных недостатков. Вследствие этого для получения количественной оценки результатов морфологического анализа предлагается использовать характеристику значимости элементов системы, называемую «весом». «Вес» показывает роль элемента z_i в структурной надежности (безопасности) системы.

Для определения «весов» функция работоспособности системы представляется [5] в ортогональной дизъюнктивно нормальной форме, тогда «вес» логической функции по определению можно записать в виде

$$g_{y(z_1, z_2, \dots, z_m)} = \frac{\sum_{f=1}^k 2^{m-r_f}}{2^m} = \sum_{f=1}^k 2^{-r_f}, \quad (1)$$

где k – число ортогональных конъюнкций в логической функции;
 r_f – ранг элементарной ортогональной конъюнкции.

После преобразования (1) получаем формулу для определения «веса» события z_i в системе:

$$g_{z_i} = \sum_{f=1}^k 2^{-(r_f-1)} - \sum_{j=1}^n 2^{-(r_j-1)}, \quad (2)$$

где k, r_f – число и ранг ортогональных конъюнкций, содержащих аргумент z_i ;
 n, r_j – число и ранг ортогональных конъюнкций, содержащих отрицание z_i' аргумента z_i .

При оценивании степени критичности элементов на основе полного сценария развития событий для каждого происшествия с агрегатом (системой) получаем значения «веса» для каждой неисправности каждого элемента.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ УЧЕТА ВКЛАДА ОТДЕЛЬНЫХ ПОДСИСТЕМ В БЕЗОПАСНОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СЛОЖНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ СТЕПЕНИ КРИТИЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ

Если оценка безопасности функционирования проводится для системы, в которую входит несколько подсистем, оказывающих различное влияние на работу агрегата (системы), то выделение наиболее критичных элементов усложняется. При этом различное количество участвующих в оценке элементов для рассматриваемых систем приводит к существенной разнице в значениях показателей критичности. В таких случаях принятие решения о перечне и сроках выполнения работ по техническому обслуживанию или определению технического состояния наиболее критичных элементов требует дополнительного обоснования.

Переход к «весу» как характеристике значимости элементов системы в виде (1) уже обеспечивает относительность измерения в диапазоне от 0 до 1 (по модулю). При этом после расчета неисправности элементов ранжируются, например, ранг «1» – неисправность элемента, имеющая максимальный «вес». Однако в подсистемах с разным количеством участвующих в оценке элементов неисправности с одинаковым рангом критичности имеют разные «веса». Для сравнения неисправностей с одинаковым рангом

необходимо выполнить нормирование весовых значений влияния отказов элементов на безопасность функционирования подсистемы.

Нормирование значений весовых показателей неисправностей элементов будем проводить путем сравнения с эталонным показателем [6] с учетом вида функций, используемых в методике расчета значений показателя «веса»:

$$g_q^{\text{норм}} = \left| \frac{g_q}{g_q^3} \right|,$$

где $g_q^{\text{норм}}$ – нормируемое значение показателя для выбранной q -й подсистемы;
 g_q – «вес», полученный в результате расчета для выбранной подсистемы;
 g_q^3 – эталонное значение.

С учетом вида функции, используемой для расчета «веса», предлагается определять эталонное значение по формуле $g_q^3 = 2^{-(p-1)}$. Здесь p соответствует числу состояний элементов, которые в расчете удельного веса инициирующих событий, связанных с отказами элементов, для выбранного полного сценария имеют ранг «1».

Для учета вклада отдельных подсистем в безопасность функционирования сложной технической системы и определения элементов из различных подсистем, имеющих максимальную степень критичности, предлагается расчет степени критичности отказов элементов для каждой подсистемы выполнять по формуле

$$g_q^{\text{уд}} = k_q^{\text{кр}} g_q^{\text{норм}},$$

где $g_q^{\text{уд}}$ – удельная степень критичности выбранной q -й подсистемы;
 $k_q^{\text{кр}}$ – коэффициент критичности выбранной подсистемы.

Для задания коэффициента критичности можно использовать подходы, описанные в [4], где при оценке влияния факторов на безопасность системы (подсистемы) устанавливаются категории значимости последствий (допустимые, значительные, недопустимые) или используется классификация тяжести последствий отказа. Вариант задания значений коэффициентов критичности представлен в табл. 1.

Таблица 1

Значения коэффициента критичности

Тяжесть последствий отказа	Значение коэффициента критичности подсистемы
Катастрофическая	4
Критическая	3
Минимальная	2
Ничтожная	1

Значения коэффициентов критичности для каждой рассматриваемой подсистемы назначаются экспертным путем. Если рассматриваемые элементы подсистемы не оказывают критичного влияния на ее работу, то степень критичности отказов для этих элементов принимается равной нулю.

Если в анализируемом полном сценарии несколько состояний какого-нибудь из элементов имеют «вес» с рангом «1», предлагается это учитывать в формуле расчета степени критичности отказов:

$$g_q^{\text{уд}} = k_q^{\text{кр}} \cdot w \cdot g_q^{\text{норм}},$$

где w – число состояний рассматриваемого элемента, которые имеют вес с рангом «1».

Пример. Рассмотрим две подсистемы: ПС1 и ПС2. В ПС1 с рангом «1» один элемент (1-1) имеет 3 неисправности, два элемента (1-2, 1-3) – по 2 неисправности, один элемент (1-4) – 1 неисправность. В ПС2 с рангом «1» два элемента (2-1, 2-2) имеют по 2 неисправности. «Вес» каждой неисправности в сценарии для ПС1 равен 0,0078125, «вес» каждой неисправности в сценарии для ПС2 равен 0,125 (в примере предполагается, что в сценариях рассматриваются только указанные неисправности, каждая из которых приводит к итоговому событию). Значения коэффициентов критичности (по табл. 1): для ПС1 – 3, для ПС2 – 4.

Результаты расчетов степени критичности систем с учетом вклада подсистем представим в табл. 2.

Таблица 2

Пример заполнения таблицы результатами расчета степени критичности

Наименование подсистемы: наименование элементов (кол-во неисправностей)	«Вес» каждой неисправности	Нормируемое значение показателя «веса» каждой неисправности	Значение коэффициента критичности подсистемы	Удельная степень критичности элементов подсистемы
Подсистема 1:			3	
1-1 (3 неискр.)	0,0078125	1		9
1-2 (2 неискр.)	0,0078125	1		6
1-3 (2 неискр.)	0,0078125	1		6
1-4 (1 неискр.)	0,0078125	1		3
Подсистема 2:			4	
2-1 (2 неискр.)	0,125	1		8
2-2 (2 неискр.)	0,125	1		8

По результатам расчета наиболее критичным является элемент 1-1, вторыми по степени критичности являются элементы 2-1 и 2-2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в статье описан процесс оценивания степени критичности элементов сложной технической системы космического ракетного комплекса, отличающийся учетом вклада отдельных подсистем в безопасность функционирования СТС при определении степени критичности элементов. Оценивание осуществляется с использованием морфологического анализа и логико-вероятностных методов. При неполной информации о вероятностных характеристиках элементов для получения количественной оценки результатов морфологического анализа используется характеристика значимости элементов системы, называемая «весом». Разработанная методика позволяет ранжировать неисправности при наличии в составе СТС нескольких подсистем и выделять критичные элементы, требующие повышенного внимания к контролю технического состояния.

Список используемых источников

1. Эксплуатация космических средств: учебник / Г. Д. Петров [и др.]; под ред. А. П. Вышинского. – СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2015. – 455 с.

2. ГОСТ Р 51901.12-2007. Менеджмент риска. Метод анализа видов и последствий отказов. – М.: Стандартинформ, 2008. – 72 с.
3. ГОСТ Р 27.302-2009. Надежность в технике. Анализ дерева неисправностей. – М.: Стандартинформ, 2010. – 23 с.
4. ГОСТ Р 27.606-2013. Надежность в технике. Управление надежностью. Техническое обслуживание, ориентированное на безотказность. – М.: Стандартинформ, 2014. – 35 с.
5. *Рябинин И. А.* Надежность и безопасность структурно-сложных систем. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2007. – 276 с.
6. *Митяков Е.С., Корнилов Д. А.* К вопросу о выборе весов при нахождении интегральных показателей экономической динамики // Труды НГТУ имени Р. Е. Алексеева. – 2011. – № 3 (90). – С. 289–299.

И. О. Кукушкин,
кандидат технических наук, доцент;
А. П. Софьин,
кандидат технических наук, доцент;
Л. А. Фёдорова,
кандидат технических наук, доцент

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛОСКОГО ДВИЖЕНИЯ УСТРОЙСТВА АМЕБОИДНОГО ТИПА

Представлены результаты исследования по моделированию плоского движения устройства, использующего амебоидный способ передвижения. Описаны принципы создания условий для движения устройства амебоидного типа. Представлена математическая модель плоского движения устройства. Показан пример использования модели для определения режимов движения в зависимости от величины активной силы при заданных условиях применения.

Ключевые слова: амебоидный, сила, момент, скорость, модель, устройство, параметры, конструкция, робот.

ВВЕДЕНИЕ

Поддержание технического состояния технологического оборудования и сооружений стартовых и технических комплексов является важной задачей, учитывая их роль в процессе подготовки и пуска ракет космического назначения. Часть элементов оборудования может размещаться в потернах, каналах и других местах, доступ к которым может быть затруднен с учетом как особенностей конструкции сооружений и оборудования, так и возможности возникновения аварийных ситуаций.

Для решения задач обследования труднодоступных мест могут применяться роботизированные средства. Однако передвижение роботов может осложняться не только стесненными условиями, но и деформациями пути, наличием поверхностей с различными коэффициентами сцепления.

Передвижение в подобных условиях может быть реализовано с помощью технических устройств, перемещение которых основано на использовании амебоидного способа движения. Детальное исследование таких представителей природы как амёб позволяет отметить основной признак организации их перемещения – появление у них выростов-образований на внешней поверхности. Именно они нужны для перемещения амёбы в заданном направлении. Движение амёбы очень похоже на процесс своеобразного растекания по поверхности.

Возможность использования амебоидного способа движения в научной литературе описана в самом общем виде [1, 2]. В качестве явного недостатка отмечается довольно низкая скорость передвижения и сложность организации процесса движения.

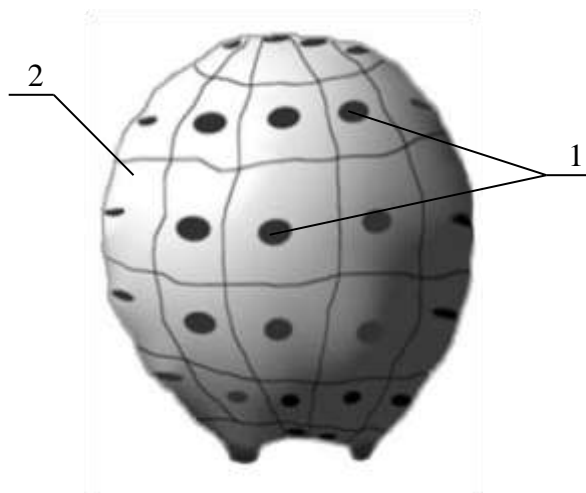
Даже с учетом очевидного недостатка представленного амебоидного способа движения, он позволяет снизить зависимость движения от сил сцепления (например, колес с поверхностью), уменьшить число кинематических пар в аппарате, увеличить надежность узлов и передач, а также значительно уменьшить воздействие на окружающую среду. Эти положительные особенности могут пригодиться и при создании устройств, предназначенных для передвижения в условиях пониженной гравитации (по поверхности планет, астероидов и иных, в том числе искусственных, объектов). В настоящее время можно считать, что интерес к данному способу передвижения, а значит, и к самим устройствам, будет постоянно расти.

ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ УСЛОВИЙ ДЛЯ ДВИЖЕНИЯ УСТРОЙСТВА АМЕБОИДНОГО ТИПА

В соответствии с перспективами применения следует полагать, что устройства, реализующие амебоидный способ передвижения, должны отличаться довольно высокой проходимостью и надежностью для их использования как в сухопутном, так и в водном варианте. Функционирование устройств, использующих именно такой способ движения, можно связывать с отсутствием необходимости учета влияния некоторых факторов и условий окружающей среды. Использование таких устройств в перспективе позволит выполнять перемещение по пересеченной местности, в том числе с мало известными параметрами подстилающей поверхности.

Основным отличительным признаком амебоидного способа передвижения следует считать перераспределение внутренней массы тела с появлением на внешней поверхности устройства выростов [2, 3]. Рассматривая исходные природные процессы образования выростов, называемых в биологии корненожками, можно утверждать следующее. Объекты, использующие амебоидный способ передвижения, должны иметь аморфный или эластичный корпус, допускающий его полное или частичное деформирование. При этом перераспределение массы внутри аморфного корпуса приводит к изменению первоначальной внешней формы оболочки. Образующиеся на корпусе выросты-«корненожки» обеспечивают контакт с поверхностью и создание условий для передвижения. Место и время их появления должны соответствовать программе передвижения.

На рис. 1 представлен вариант выполнения оболочки технического устройства, реализующего амебоидный способ передвижения.



*Рис. 1. Вариант устройства, реализующего амебоидный способ передвижения:
1 – отсек «корненожки»; 2 – внешняя оболочка*

Вполне вероятно, что использование признаков амебоидного способа передвижения позволит создать малогабаритные устройства для мониторинга оборудования и транспортировки грузов в сложных условиях местности. Это могут быть небольшие, дистанционно-управляемые роботы, в основе которых будут использоваться осесимметричные тела, например, цилиндр.

Движение аппарата, обладающего амебоидными признаками перемещения, следует и удобнее рассматривать как сложное движение, включающее в себя переносное поступательное движение с центром масс и вращение конструкции относительно центра масс. В этом

случае обеспечение создания математического аппарата можно связать с двумя вариантами выполнения устройства:

- первый вариант основан на реализации плоского движения цилиндра;
- второй, более сложный вариант, основан на реализации движения, подобного качению шара по плоскости.

Соответственно, базовыми конструкциями для этих двух случаев будут выступать цилиндр и сфера. В обоих случаях при движении аппарата контакт с плоскостью обеспечивается с помощью амебоидных выростов. Порядок их контактирования с поверхностью и источники энергии для осуществления перемещения объекта могут значительно отличаться.

МОДЕЛЬ ПЛОСКОГО ДВИЖЕНИЯ УСТРОЙСТВА АМЕБОИДНОГО ТИПА

В настоящей работе в качестве первого варианта предлагается способ математического моделирования движения с использованием амебоидных элементов на базе неоднородного цилиндрического тела, катящегося по неподвижной плоскости (рис. 2).

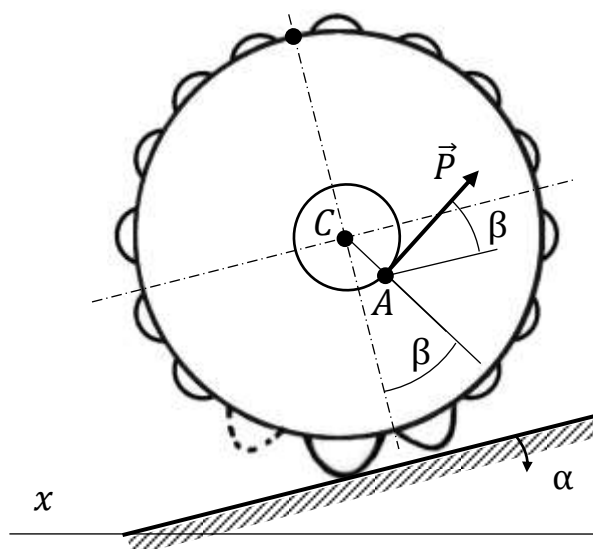


Рис. 2. Схема к модели плоского движения устройства амебоидного типа:
 α – угол наклона неподвижной плоскости к горизонту; β – угол привязки, определяющий расположение точки A (точки приложения силы \vec{P}); C – центр масс тела

Плоское движение этого тела исследуется в одном из вариантов перемещения объемов жидкости внутри жесткой цилиндрической оболочки корпуса и приведения внешних сил, возникающих в период движения, к главному вектору. Необходимо отметить, что контакт конструкции с внешней шероховатой поверхностью обеспечивается выпирающими псевдоподиями (выростами-«корненожками») на эластичной внешней оболочке корпуса [2].

Заметим, что плоскость считается неподвижной в каждый отдельный момент времени, но по мере движения в зависимости от условий угол α может меняться. Кроме того, в процессе перемещения аппарата меняется угол β .

Математическая модель для исследования движения аппарата должна позволять:

- 1) определять величину побуждающей силы \vec{P} , под действием которой обеспечивается качение без скольжения;
- 2) анализировать периоды движения аппарата, включая его остановки;
- 3) определять кинематические параметры аппарата при его движении.

В первую очередь речь идет о движении центра тяжести и вращении аппарата вокруг оси, проходящей через центр тяжести перпендикулярно плоскости движения. Дальнейшие исследования связаны с моделированием движения тел при их качении по поверхностям и основаны на методах и способах, представленных в работах [4, 5]. Представленные ниже модели движения базируются также на известных классических теориях и положениях [6, 7].

В основе исследований и разработки математической модели лежит расчетная схема, показанная на рис. 3.

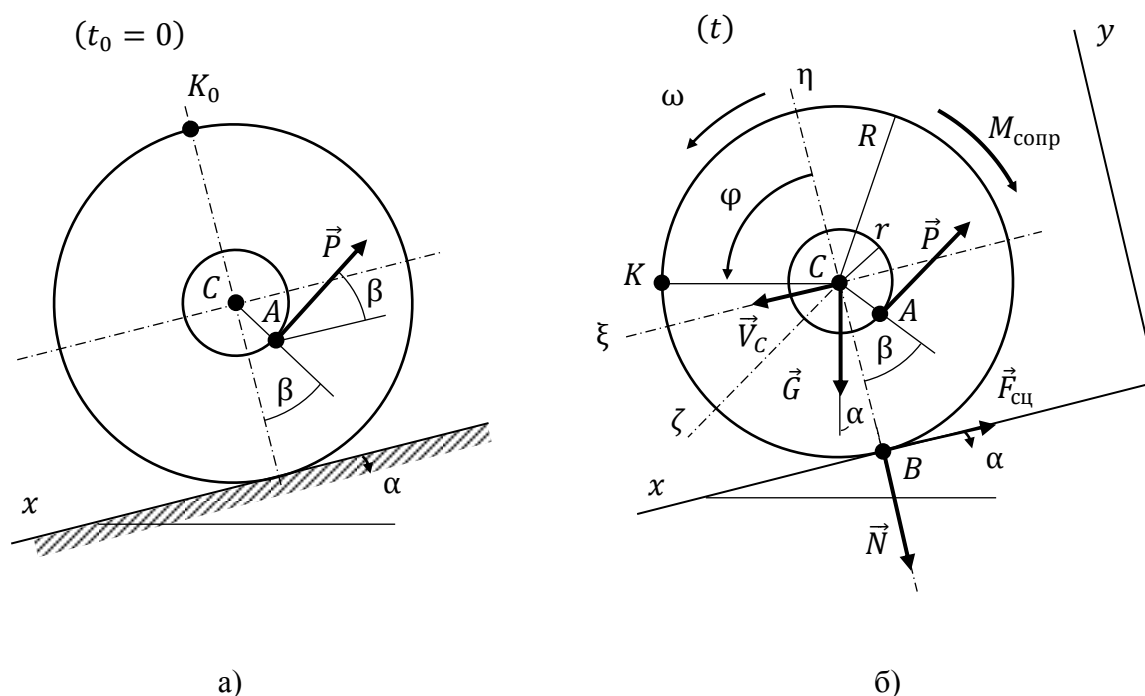


Рис. 3. Плоская фигура, полученная сечением цилиндра плоскостью, в которой движется центр масс плоской фигуры:
а – начальное положение; б – текущее положение;

B – мгновенный центр скоростей; K – фиксированная точка на наружной поверхности цилиндра, совпадающая в начальный момент с точкой K_0 ; x, y – оси условно неподвижной системы координат; ξ, η, ζ – оси трехмерной системы координат, связанной с центром масс C объекта; \vec{N} – нормальная реакция; φ – угол поворота объекта; ω – угловая скорость объекта; \vec{V}_c – скорость центра масс; \vec{G} – сила тяжести; $\vec{F}_{\text{сц}}$ – сила сцепления; R, r – радиусы большой и малой окружностей сечения цилиндра вертикальной плоскостью, проходящей через центр масс C ; $M_{\text{сопр}}$ – момент сопротивления качению

Введем основные допущения:

- рассматриваем робот как цилиндрический каток, движущийся по шероховатой наклонной плоскости;
- контакт аппарата с наклонной плоскостью создается с помощью выростов-корненожек.

Из базовых положений теоретической механики известно, что плоское движение тела можно представить в виде поступательного движения плоской фигуры вместе с полюсом – центром масс тела, а также ее вращательного движения вокруг оси $C\zeta$ (рис. 3, б), перпендикулярной плоскости рисунка. Для тела, совершающего плоское движение и имеющего три степени свободы, вводятся три обобщенные координаты: декартовы координаты центра масс $C (x_c, y_c)$ и угол поворота тела φ .

Дифференциальные уравнения плоского движения цилиндра имеют вид [3]:

$$m\ddot{x}_C = \sum_1^n F_{kx}^e, \quad m\ddot{y}_C = \sum_1^n F_{ky}^e, \quad I_{C\zeta}\ddot{\varphi} = \sum_1^n M_{C\zeta}(\vec{F}_k^e) \quad (1)$$

или

$$m\ddot{x}_C = F_x^e, \quad m\ddot{y}_C = F_y^e, \quad I_{C\zeta}\ddot{\varphi} = M_{C\zeta}^e,$$

где m – масса тела;

F_x^e, F_y^e – проекции на оси x и y главного вектора внешних сил (активных и реакций внешних связей), приложенных к телу;

$M_{C\zeta}^e$ – главный момент всех внешних сил, приложенных к телу, относительно оси $C\zeta$;

$I_{C\zeta}$ – момент инерции тела относительно оси $C\zeta$, проходящей через его центр масс перпендикулярно плоскости движения $xу$.

При исследовании плоского движения несвободного тела систему (1), содержащую неизвестные величины $\ddot{x}_C, \ddot{y}_C, \ddot{\varphi}$, дополним уравнениями, учитывающими неизвестные реакции внешних связей и возникающие из-за них ограничения. Внешние силы, действующие на рассматриваемый объект, представлены на рис.3,б. В рассматриваемом случае несвободного плоского движения цилиндрического катка на него налагается связь в виде негладкой плоскости. На каток действуют активные силы: возникающая при перемещении массы внутри оболочки сила \vec{P} и сила веса устройства $\vec{G} = m\vec{g}$. Кроме того, в соответствии с принципом освобождения от связей, к нему приложены реакции внешних связей:

\vec{N} – нормальная реакция;

$\vec{F}_{\text{сц}}$ – сила сцепления, направленная как показано на рис. 3,б;

$M_{\text{сопр}}$ – момент сопротивления качению (момент трения качения), направленный в сторону, противоположную вращению катка (противоположно угловой скорости $\dot{\varphi}$), т.е. по часовой стрелке.

Все представленные реактивные элементы являются неизвестными. Используя уравнения (1), составим полную систему уравнений с учетом всех внешних связей, показанных на рис. 3,б:

$$\begin{aligned} m\ddot{x}_C &= G \sin \alpha - F_{\text{сц}} - P \cos \beta; \\ m\ddot{y}_C &= N - G \cos \alpha + P \sin \beta; \\ I_{C\zeta} \cdot \ddot{\varphi} &= F_{\text{сц}} \cdot R + P \cdot r - M_{\text{сопр}}. \end{aligned} \quad (2)$$

В уравнениях (2) момент инерции устройства определяется выражением

$$I_{C\zeta} = m\rho_C^2,$$

где ρ_C – радиус инерции устройства относительно оси $C\zeta$.

Анализ системы уравнений (2) показывает наличие семи неизвестных величин, а именно:

$$x_C, y_C, \ddot{\varphi}, N, F_{\text{сц}}, M_{\text{сопр}}, P.$$

Для определения неизвестных величин к уравнениям (2) добавляем уравнения, вытекающие из свойств наложенной связи:

а) уравнение геометрической связи (робот лежит на связи)

$$y_C = R = \text{const}; \quad (3)$$

б) уравнение кинематической связи – по плоскости объект катится без скольжения, поэтому его мгновенный центр скоростей находится в точке B , следовательно,

$$v_B = 0; \quad (4)$$

в) уравнение, характеризующее свойство негладкой плоскости,

$$M_{\text{сопр}} = \delta \cdot N, \quad (5)$$

где δ – коэффициент трения качения.

Учитывая, что свойство негладкой плоскости проявляется еще и в том, что сила сцепления определяется неравенством:

$$F_{\text{сц}} \leq f_{\text{сц}} \cdot N, \quad (6)$$

где $f_{\text{сц}}$ – коэффициент сцепления, получаем совокупность уравнений и неравенств (2)–(6), которая и представляет собою полную систему уравнений движения рассматриваемого устройства.

В ходе интегрирования уравнений системы (2) могут быть получены кинематические характеристики плоского движения объекта:

$$\begin{aligned} \dot{x}_C &= \dot{x}_C(t), & \dot{y}_C &= \dot{y}_C(t), & \dot{\varphi}_C &= \dot{\varphi}_C(t); \\ \ddot{x}_C &= \ddot{x}_C(t), & \ddot{y}_C &= \ddot{y}_C(t), & \ddot{\varphi}_C &= \ddot{\varphi}_C(t). \end{aligned} \quad (7)$$

Эти решения характеризуют изменения в движении аппарата: возможные остановки и смену направления движения центра масс. Напомним, что, в соответствии с поставленной задачей, необходимо найти значение активной силы \vec{P} , под действием которой робот катится по негладкой плоскости без скольжения. При этом условии сила сцепления будет максимальной, поэтому свойство негладкой плоскости будет выражено равенством

$$F_{\text{сц}} = F_{\text{сц}}^{\text{max}} = f_{\text{сц}} \cdot N. \quad (8)$$

Решив совместно (2)–(5) и (8), с учетом (7) получим следующие выражения:

– скорость и ускорение центра масс по оси y

$$\dot{y}_C = 0, \ddot{y}_C = 0;$$

– скорость и ускорение центра масс по оси x

$$\dot{x}_C = v_C = \omega \cdot R = \dot{\varphi} R, \quad \ddot{x}_C = \ddot{\varphi} \cdot R; \quad (9)$$

– нормальную реакцию и момент сопротивления качению

$$N = G \cos \alpha - P \sin \beta, \quad M_{\text{сопр}} = G \cdot \delta \cdot \cos \alpha - P \cdot \delta \cdot \sin \beta. \quad (10)$$

– уравнение поступательного движения по оси x

$$m \ddot{x}_C = G \sin \alpha - F_{\text{сц}} - P \cos \beta; \quad (11)$$

– уравнение вращательного движения вокруг оси $C\zeta$

$$m \rho_C^2 \ddot{\varphi} = F_{\text{сц}} \cdot R + P \cdot r - G \cdot \delta \cdot \cos \alpha + P \cdot \delta \cdot \sin \beta. \quad (12)$$

Совместное решение (11) и (12) с учетом (9) и (10) дает выражение для определения значения активной силы P :

$$P = \frac{-F_{\text{сц}}(\rho_C^2 + R^2) + G(\rho_C^2 \sin \alpha + \delta \cdot R \cdot \cos \alpha)}{\rho_C^2 \cos \beta + r \cdot R + \delta \cdot R \cdot \sin \beta}. \quad (13)$$

Выражение (13) позволяет судить о правильности выбранного на рис. 3 направления силы сцепления $\vec{F}_{\text{сц}}$. Приближение силы \vec{P} к своему предельному значению (искомой величине) при заданном направлении силы \vec{P} (рис. 3) сопровождается, естественно, возрастанием силы сцепления $\vec{F}_{\text{сц}}$. Поэтому в выражении (13), приведенном к виду $P = aF_{\text{сц}} + b$, коэффициент a должен быть положительной величиной. Однако, в рассматриваемом случае значение этого

коэффициента меньше 0, что свидетельствует о неверном выборе направления силы сцепления на рис. 3.

Изменив направление силы сцепления на обратное и внеся соответствующие исправления в равенства (2), (11) и (12), получим:

$$m\ddot{x}_C = G \sin \alpha + F_{\text{сц}} - P \cos \beta; \quad (14)$$

$$m\rho_C^2 \cdot \ddot{\varphi} = -F_{\text{сц}} \cdot R + P \cdot r - M_{\text{сопр}}; \quad (15)$$

$$P = \frac{F_{\text{сц}}(\rho_C^2 + R^2) + G(\rho_C^2 \sin \alpha + \delta \cdot R \cdot \cos \alpha)}{\rho_C^2 \cos \beta + r \cdot R + \delta \cdot R \cdot \sin \beta}. \quad (16)$$

С учетом (8) и (14) запишем выражение для максимального значения силы, под действием которой робот катится без скольжения:

$$P = \frac{G[(R^2 + \rho_C^2)f_{\text{сц}} \cos \alpha + \rho_C^2 \sin \alpha + \delta \cdot R \cdot \cos \alpha]}{(R^2 + \rho_C^2)f_{\text{сц}} \sin \beta + \rho_C^2 \cos \beta + R(r + \delta \cdot \sin \beta)}. \quad (17)$$

ПРИМЕР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ УСТРОЙСТВА АМЕБОИДНОГО ТИПА

С целью пояснения процесса получения требуемых кинематических характеристик для исследуемого устройства выполним расчеты при следующих выбранных, исходя из предполагаемого назначения робота, значениях параметров устройства и поверхности передвижения:

$$\begin{aligned} m &= 300 \text{ кг}, \quad R = 0,8 \text{ м}, \quad r = 0,8 \text{ м}; \\ \alpha &= 18^\circ, \quad \beta = 30^\circ; \\ f_{\text{сц}} &= 0,2; \quad \mu = 0,0075 \text{ м}. \end{aligned}$$

где $f_{\text{сц}}$ – коэффициент трения покоя (коэффициент сцепления);
 μ – коэффициент трения качения.

За начальное положение самого аппарата примем его положение при остановке ($t_0 = 0$). Полную систему уравнений (2)–(6) предлагается решить при следующих начальных условиях (для $t_0 = 0$):

$$\varphi_0 = 0; \quad \omega_0 = 5,0 \text{ рад/с}; \quad x_{C0} = 0; \quad V_{C0} = 4,0 \text{ м/с}.$$

При выбранных значениях параметров на основании (8), (10) и (17) получаем:

$$N = 2012,7 \text{ Н}; \quad F_{\text{сц}}^{\text{max}} = 402,5 \text{ Н}; \quad M_{\text{сопр}} = 15,1 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad P = 1572,8 \text{ Н}.$$

На основе (14) и (15) получаем, что центр масс робота движется вдоль оси x с постоянным ускорением $a_c = -0,167 \text{ м/с}^2$, а вращение робота вокруг оси CZ , проходящей через его центр масс перпендикулярно плоскости движения $xу$, происходит с угловым ускорением $\ddot{\varphi} = -0,208 \text{ рад/с}^2$.

С учетом рассчитанных значений ускорений получим кинематические характеристики движения робота:

$$\begin{aligned} \dot{x}_C &= \dot{x}_{C0} - 0,167t; \quad x_C = x_{C0} + 4t - 0,0835t^2; \\ \dot{\varphi} &= \dot{\varphi}_0 - 0,208t; \quad \varphi = \varphi_0 + 5t - 0,104t^2 \end{aligned}$$

или, при выбранных начальных условиях,

$$\begin{aligned} \dot{x}_C &= 4,0 - 0,167t; \quad x_C = 4t - 0,0835t^2; \\ \dot{\varphi} &= 5,0 - 0,208t; \quad \varphi = 5t - 0,104t^2. \end{aligned}$$

Полученные решения показывают, что робот катится вдоль положительного направления оси x замедленно (см. рис. 3,б).

Характеристические зоны и соответствующие режимы движения в зависимости от величины активной силы можно представить в виде табл. 1.

Таблица 1

Периоды плоского движения цилиндрического робота

Характеристические зоны	Значения модуля силы P , Н	Направление и модуль силы сцепления	Характеристика движения
I	$P = 0$ Н		Объект лежит на связи. Движение на спуск без проскальзывания при $18^\circ \leq \alpha \leq 31^\circ$, движение на спуск с проскальзыванием при $\alpha \geq 31^\circ$
	$0 < P < 1507,4$ Н		Объект лежит на связи. Движение на спуск без скольжения
	$0 < P < 724,9$ Н	$F_{\text{сц}} < F_{\text{сц}}^{\text{max}}$, направлена в сторону подъема	
	$F_{\text{сц}}$ меняет знак		
	$724,9 < P < 1507,4$ Н	$F_{\text{сц}} < F_{\text{сц}}^{\text{max}}$, направлена в сторону спуска	
II	$P = 1507,4$ Н		Состояние неустойчивого статического равновесия (мгновенная остановка)
	$1507,4 < P < 1530,4$ Н	$F_{\text{сц}} < F_{\text{сц}}^{\text{max}}$, направлена в сторону спуска	Объект лежит на связи. Движение на подъем без скольжения
III	$1530,31 < P < 5597,9$ Н	$F_{\text{сц}} = F_{\text{сц}}^{\text{max}}$, направлена в сторону спуска	Объект лежит на связи. Движение на подъем со скольжением
IV	$P = 5597,9$ Н	$F_{\text{сц}} = 0$	Объект покидает связь. Свободное плоское движение вниз

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в статье представлена модель плоского движения устройства амeboидного типа. Математическая модель основана на использовании динамических и кинематических уравнений. Представленный анализ движения аппарата, использующего амeboидные признаки, можно рассматривать как методику расчета параметров его движения при заданных условиях применения. Результаты расчетов позволяют получить исходные данные для коррекции физической модели и формирования предложений по выбору конструкции устройства.

Показано влияние величины силы \vec{P} на характер движения аппарата. Выделяются явные зоны изменения характера движения. Границы зон определяются пороговыми значениями

модуля активной силы \vec{P} . Характеристика полученных зон полностью связана с выбором варианта движения аппарата.

Использование амебоидного способа движения может оказаться полезным при создании робототехнических средств, обеспечивающих доставку оборудования или транспортировку грузов в труднодоступные зоны.

Список используемых источников

1. Pat. 8662213 USA, МКI В25J 11/00. Locomotion of amorphous surface robots / Arthur T. Bradley (USA). – No. 342264; appl. 03.01.2012; publ. 04.03.2014; NKI 180/7.1 – 11 p.
2. Состояние и перспективы развития движителей космических роботов / А. А. Ардашов [и др.] // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2017. – Вып. 656. – С. 85–91.
3. Софьин А. П., Фёдорова Л. А., Сударь Ю. М. К вопросу применения аморфных устройств // Труды МАИ. – 2022. – № 122. – С. 1–24.
4. Виноградова О. А. Движение цилиндра по подвижной плоскости с трением // Прикладная математика и механика. – 2016. – № 80. – С. 444–449.
5. Ишлинский А. Ю., Христианович С. А. Механика и техника // Прикладная математика и механика. – 1977. – Т. 41, № 5. – С. 790–801.
6. Бутенин Н. В., Лунц Я. Л., Меркин Д. Р. Теоретическая механика. – СПб.: Лань, 2008. – 736 с.
7. Маркеев А. П. Динамика тела, соприкасающегося с твердой поверхностью. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1992. – 336 с.

В. В. Лисицкий,
доктор технических наук;
А. М. Мартынов

КОНЦЕПЦИЯ АДАПТИВНОГО СИТУАЦИОННОГО СИНТЕЗА СТРУКТУР СИСТЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В статье представлены научные и методические основы синтеза сложных технических систем военного назначения в виде концепции адаптивного ситуационного синтеза структур системы эксплуатации сложных технических систем.

Ключевые слова: сложная техническая система, адаптивное ситуационное управление, синтез структур системы эксплуатации сложных технических систем.

ВВЕДЕНИЕ

Успешное функционирование сложных технических систем (СТС), например: систем связи и телекоммуникаций, систем энергоснабжения, транспортных систем и т. п., напрямую зависит от системы эксплуатации (СЭ). Система эксплуатации создается совместно с самой сложной технической системой на этапах предъявления требований, изготовления, строительства. От качества функционирования СЭ зависят готовность СТС выполнять задачи по предназначению, уровень исправности, а также затраты на эксплуатацию.

Ретроспективный анализ показывает, что существующие подходы к синтезу СЭ неоднократно менялись и прошли длительный путь становления и развития. На этапе зарождения подход к синтезу СЭ СТС предполагал, что каждый главный конструктор под создаваемую СТС закладывал свою нормативную базу эксплуатации. Это предопределяло неупорядоченное функционирование СЭ СТС и приводило к дополнительной нагрузке на эксплуатирующий персонал и сверхнормативным затратам материальных и технических ресурсов. В дальнейшем подход к синтезу СЭ СТС развивался на изучении опыта эксплуатации с целью достижения максимальной эффективности функционирования СТС. Подход к синтезу СЭ СТС осуществлялся исходя из следующей постановки задачи: обеспечить требуемую готовность системы при минимальных затратах или максимальную готовность при ограниченном финансировании. В настоящее время такой подход следует признать сильно упрощенным. Это, прежде всего, связано с изменившимися взглядами на эксплуатационную деятельность и степень ответственности за ее результаты, увеличением числа, разнообразия и сложности систем, необходимостью увеличения длительности эксплуатации и снижения стоимости эксплуатации.

На основе изучения отечественных и зарубежных работ, посвященных теории и практике эксплуатации сложных технических объектов (СТО), а также анализа многолетнего опыта научно-технического сопровождения эксплуатации объектов космодрома Байконур, осуществляемого Военно-космической академией имени А. Ф. Можайского совместно с предприятиями космической отрасли, разработан ряд концептуальных положений (принципов), которые должны быть отражены в основе концепции создания СЭ новых космодромов и модернизации действующих [1].

Для обеспечения выполнения этой задачи в любых условиях обстановки необходимо поддерживать готовность на требуемом уровне. Исходя из того, что на современном этапе выполнение задач немисливо без сложных систем вооружения (СВ), ведущая роль в обеспечении готовности отводится СЭ СТС обеспечения функционирования этих СВ. СЭ СТС представляют собой совокупность взаимосвязанных органов управления, отвечающих за организацию

соответствующих видов обеспечения, сил и средств обеспечения, объединенных единством цели и функционирующих на общих принципах. Качество функционирования СЭ СТС во многом зависит от вида и параметров структуры самих систем, а также возможности систем адаптироваться к динамически изменяющейся обстановке.

Концепция обеспечения требуемой готовности в изменяющейся обстановке построена на *принципе адаптивного ситуационного управления структурой СЭ СТС*, сущность которого заключается в том, что оперативное обеспечение требуемой готовности возможно только на основе заранее подготовленных вариантов управляющих решений для возможных вариантов развития обстановки. При этом заранее определены оптимальные варианты структуры СЭ СТС для каждой из типовых ситуаций управления. Так как трудоемкий по времени и средствам анализ проводится при этом на априорном этапе управления, достигается высокая оперативность реагирования на изменение обстановки [3]. Под концепцией здесь понимается совокупность общих подходов и принципов к управлению структурой СЭ СТС в изменяющихся условиях, а также общая характеристика применяемого при этом научно-методического обеспечения.

Логико-графическая иллюстрация основных этапов реализации предложенной концепции и состава применяемого научно-методического обеспечения приведена на рис. 1. Основными этапами реализации концепции являются этапы априорного синтеза множества структур СЭ СТС и адаптивного апостериорного ситуационного выбора структуры СЭ СТС.

На этапе априорного синтеза множества структур СЭ СТС решаются следующие задачи:

- формирование множества требований к воинским формированиям и СЭ СТС; формирование множества возможных ситуаций, которые могут возникнуть на рассматриваемом интервале планирования;
- формирование наборов структур для каждого элемента множества возможных ситуаций; формирование показателей качества альтернативных структур СЭ СТС и способов их оценивания;
- ранжирование альтернативных структур и выбор предпочтительной структуры СЭ СТС (создание базы ситуаций, в которой каждой типовой ситуации сопоставлена предпочтительная структура СЭ СТС).

На этапе апостериорного адаптивного ситуационного выбора структуры СЭ СТС решаются задачи:

- идентификации текущей ситуации;
- выбора наиболее близкой ситуации из ранее сформированной базы типовых ситуаций для текущей идентифицированной ситуации;
- коррекции множества типовых ситуаций и множества предпочтительных вариантов структур СЭ СТС (путем добавления новых элементов и связей) при необходимости

Для формирования множеств возможных ситуаций и наборов альтернативных структур для каждого элемента множества возможных ситуаций предлагается использовать *метод формирования альтернативных структур СЭ СТС для типовых ситуаций в изменяющейся обстановке* [4].

На первом этапе метода выполняется построение множества возможных ситуаций путем комбинирования дискретных элементов, представляющих собой отдельные виды текущих и возможных состояний СВ, требований к СВ и состояний СЭ СТС:

$$K^1_{Sit} = \langle S_{mp_i} = \text{const}, S_{св_i} = \text{var}, S_{сэ\ cмc_i} = \text{const} \rangle, K^1_{Sit} \in \{Sit^1\}; \quad (1)$$

$$K^2_{Sit} = \langle S_{mp_i} = \text{var}, S_{св_i} = \text{const}, S_{сэ\ cмc_i} = \text{const} \rangle, K^2_{Sit} \in \{Sit^2\}; \quad (2)$$

$$K^3_{Sit} = \langle S_{mp_i} = \text{const}, S_{св_i} = \text{const}, S_{сэ\ cмc_i} = \text{var} \rangle, K^3_{Sit} \in \{Sit^3\}; \quad (3)$$

$$K^n_{Sit} = \langle S_{mp_i} = \text{var}, S_{св_i} = \text{var}, S_{сэ\ cмc_i} = \text{var} \rangle, K^n_{Sit} \in \{Sit^n\}. \quad (4)$$

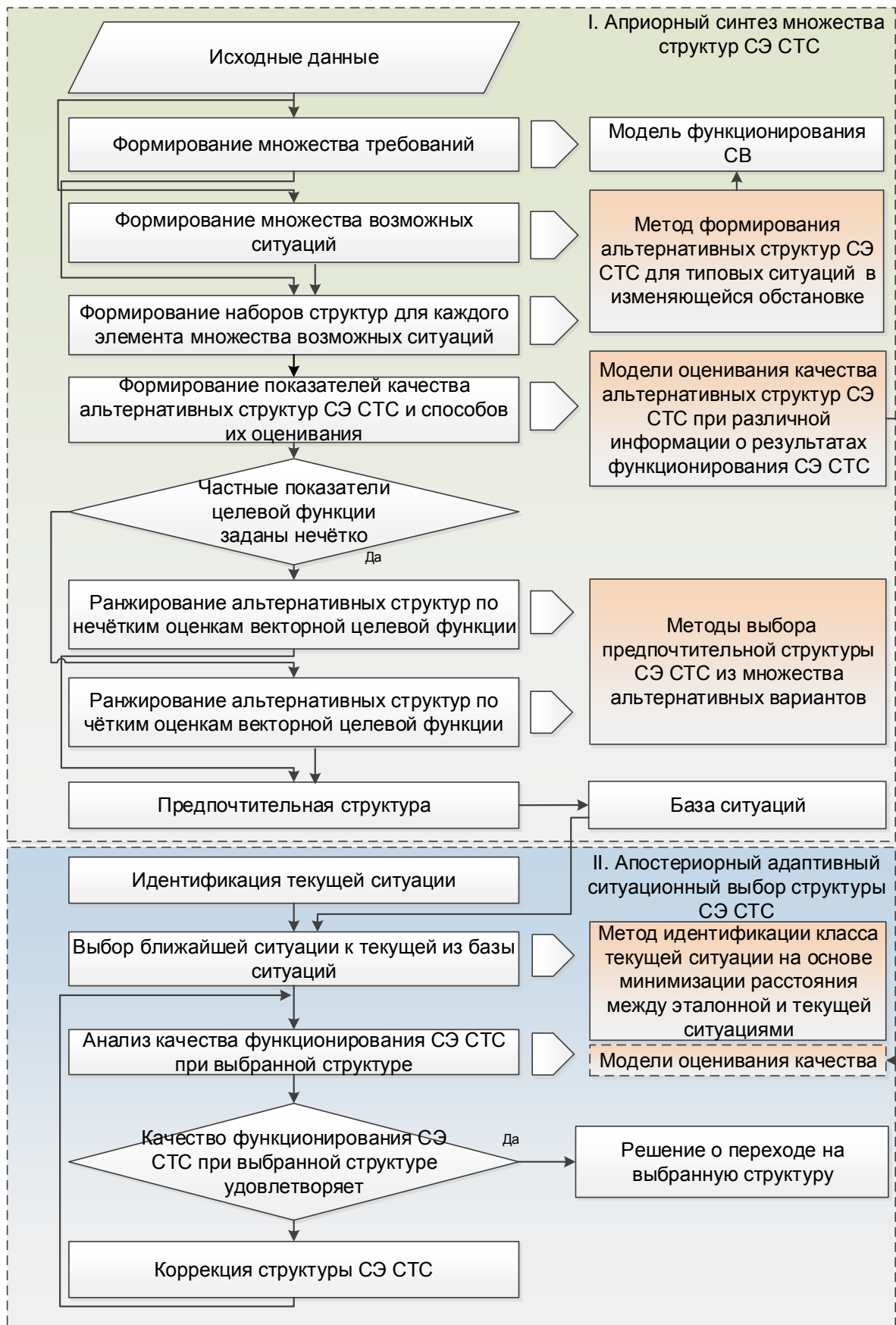


Рис. 1. Логико-графическая иллюстрация концепции адаптивного ситуационного синтеза структур СЭ СТС

На основе мнения экспертов о шансах появления гипотетических ситуаций вычисляются субъективные вероятности ситуаций, которые представляют собой числовые оценки степени достоверности ситуации. Мнение экспертов основывается на понимании ими объективных причинно-следственных связей между ситуациями и условиями их появления. Используя свои знания и опыт, они определяют закономерности причинно-следственных связей и оценивают шансы появления ситуаций в виде субъективных вероятностей.

Следующим этапом метода формирования альтернативных структур является формирование полного множества альтернативных структур СЭ СТС для типовых ситуаций в изменяющейся обстановке. При этом выполняются:

а) декомпозиция процесса функционирования СЭ СТС на подпроцессы и реализующие их составные части функциональной структуры:

1) задание функций, фиксирующих операции при выполнении задач;

$$\{E\} = \varphi_j : R_j \rightarrow \{M_j : j = 1, |R_n|\}, \quad (5)$$

где φ_j – функция фиксирующая задачи СЭ СТС на множестве объектов различных типов (РЛС, РТС, ЗРК, КА и т.д.);

R_j – множество объектов различных типов – состояние СВ;

M_j – множество задач СЭ СТС выполняемых на множестве объектов различных типов;

2) деление общей задачи на подзадачи (операции) в зависимости от заданных функций и сопоставление каждой операции элемента (модуля), реализующего выполнение заданной операции;

б) комбинирование элементов и связей между элементами:

1) указание связей между подсистемами путем задания отношения

$$\{Sv\} = \{V, R\} \text{ при } R \subseteq V \times V; \quad (6)$$

где V – множество, на котором определено отношение;

R – множество пар, для которых это отношение выполнено.

2) определение структуры как совокупности элементов и наиболее устойчивых связей между ними, и среды:

$$Str_i \supset \{E\} \times \{Sv\} \leftarrow \{\Omega\}. \quad (7)$$

Здесь $\{\Omega\}$ – множество описывающее «среду»:

$$\{\Omega\} = \{\pi\} \times \{\Theta\} \times \{3\}; \quad (8)$$

где π – модель противника, $\pi = \overset{def}{\{(W, \sigma, \rho), q_y, q, \zeta\}}$;

Θ – модель природы, $\Theta : \varepsilon\chi \rightarrow q$;

3 – модель надсистемы, $3 = \{3_i : i = \overline{1, n}\}$;

в) сужение полного множества структур СЭ СТС:

1) выделение изолированных, висячих и тупиковых вершин;

2) проверка структур на избыточность и наличие контуров:

$$K_{Str}^n \Rightarrow \{Str_{m СЭ СТС}^n\}. \quad (9)$$

С целью формирования показателей качества функционирования альтернативных структур и способов их оценивания предложен следующий способ. Для оценивания альтернативных структур выбраны показатели вероятности и времени выполнения задач в СЭ СТС. В условиях ограниченного объема информации о результатах функционирования СЭ СТС син-

тезированной структуры предлагается использовать следующие модели, подробно описанные в работе [5]:

- модель оценивания вероятностных и временных характеристик выполнения задач для альтернативной структуры СЭ СТС при четкой исходной информации;
- модель оценивания вероятностных и временных характеристик выполнения задач для альтернативной структуры СЭ СТС при нечеткой исходной информации.

Модель оценивания вероятностных и временных характеристик выполнения задач для альтернативной структуры СЭ СТС при четкой исходной информации учитывает следующую особенность функционирования СЭ СТС. В процессе функционирования СЭ СТС задачи выполняются как в одной подсистеме, так и в нескольких подсистемах СЭ СТС. Процесс функционирования СЭ СТС представляется в виде сети массового обслуживания (СеМО), узлы которой моделируются как многоканальные системы массового обслуживания (СМО) описывающие функционирование отдельных подсистем СТС, что позволяет получить количественные оценки вероятностных и временных показателей выполнения задач СЭ СТС в изменяющейся обстановке при четкой информации о значении интенсивности суммарного потока задач.

В рамках второй модели аналитическая зависимость вероятности и длительности выполнения задач СЭ СТС от аналогичных показателей ее подсистем в условиях ограниченного объема исходной информации строится на основе использования нечетких экспертных оценок вероятностей и длительностей выполнения задач в подсистемах СЭ СТС. Применение нечетких экспертных оценок позволяет повысить оперативность получения вероятностных и временных характеристик выполнения задач СЭ СТС в целом. Результатом решения этой задачи является зависимость вероятности и длительности выполнения общей задачи СЭ СТС от вероятностей и длительностей выполнения задач в подсистемах СЭ СТС каждой альтернативной структуры СЭ СТС для каждого элемента множества возможных ситуаций.

Для выбора предпочтительной структуры СЭ СТС из множества альтернативных вариантов для каждого элемента множества возможных ситуаций предлагаются следующие методы:

- метод выбора предпочтительной структуры СЭ СТС из множества альтернативных вариантов на основе ранжирования вариантов по минимизации невязки частных показателей векторной целевой функции [6];
- метод выбора предпочтительной структуры СЭ СТС из множества альтернативных вариантов на основе ранжирования вариантов по нечетким оценкам частных показателей векторной целевой функции [7].

Первый метод учитывает взаимозависимости частных показателей качества функционирования альтернативных структур СЭ СТС, что позволяет повысить степень обоснованности решений по выбору предполагаемой структуры СЭ СТС в конкретной ситуации, и при этом не является итерационным, что позволяет сократить время решения задачи. Исходными данными для метода является зависимость вероятности и длительности выполнения общей задачи СЭ СТС от вероятностей и длительностей выполнения задач в подсистемах СЭ СТС альтернативной структуры:

$$f_{(n)}(\{T_{z_i}\}, \{P_{z_i}\}) = f_{(n)} : \begin{cases} T_{z_i} = a_0 + a_y \tau_y + a_p \tau_p + a_d \tau_d + a_e \tau_e + a_n \tau_n + \\ + a_3 \tau_3 + a_n \tau_n + a_{dn} \tau_d \tau_n - a_{yp} \tau_y \tau_p \tau_e - a_{ye3} \tau_y \tau_e \tau_3 \\ P_{z_i} = b_0 + b_y p_y + b_p p_p + b_d p_d + b_e p_e + b_n p_n + \\ + b_3 p_3 + b_n p_n + b_{y3} p_y p_3 - b_{pe} p_p p_e - b_{e3} p_e p_3 \end{cases} \quad (10)$$

Теоретической основой метода являются подходы линеаризации и аппроксимации применительно к оптимизации векторных функций. Идея метода выбора предпочтительной структуры СЭ СТС из множества альтернативных вариантов базируется на переходе от решения задачи многокритериальной нелинейной оптимизации к последовательности более простых задач линейной оптимизации.

Выбор предпочтительной структуры СЭ СТС осуществляется в несколько этапов.

Этап 1. Замена исходного множества частных показателей τ_i и p_i множеством $x = \{x_j | j \in J\}$, а множество постоянных переменных $a_0, a_y, \dots, a_n, b_0, b_y, \dots, b_n$ – множеством $b = \{b_i | i \in I\}$.

Этап 2. Запись целевой функции в виде $f(x) = \{f_i(x) | i \in I\}$.

Этап 3. Замена целевой функции $f(x)$ функцией Φ_f при условии, что невязка в D $\Delta_1 = p_f = p(f, \Phi_f) \stackrel{df}{=} \max_{i \in I} p_i$ достигает минимума при Φ_f^0 в классе H_Σ^v $p(f, \Phi_f^0) = \inf_{\Phi_f \in H_\Sigma^v} p(f, \Phi_f)$.

Этап 4. Решение задачи приближения по Чебышеву несовместной системы линейных уравнений $\sum_{j=1}^n a_{ij} Y_j - b_i = 0$ при условии, что величина невязки $\Delta_2 = \max_{i \in I} \left| \sum_{j=1}^n a_{ij} Y_j - b_i \right|$, принимаемая за меру приближения, минимально возможная $\Delta_2 = \Delta_2^0 = \min_{Y \in D_Y} \Delta_2$.

Этап 5. Определение x компонент искомым векторов как корней n независимых уравнений $\psi_j(x_j) - Y_j^* = 0$.

Второй метод использует нечеткое описание оценок частных показателей качества альтернативных структур, а также способ группового экспертного нечеткого оценивания качества структур, что позволяет повысить обоснованность решений по выбору предпочтительной структуры СЭ СТС за счет расширения информационной базы принятия решений в условиях неопределенности путем формализации и использования нечетких экспертных знаний. Результатом решения этой задачи являются предпочтительные структуры СЭ СТС для каждого элемента множества возможных ситуаций.

Исходные данные для метода следующие:

$X = \{Str_1^{*\Delta t} \text{ СЭ СТС}, Str_2^{*\Delta t} \text{ СЭ СТС}, \dots, Str_n^{*\Delta t} \text{ СЭ СТС}\}$ – множество альтернативных структур для i -й ситуации;

$\mu^\xi(i)$ – нечеткие оценки вероятности и длительности выполнения общей задачи СЭ СТС каждой альтернативной структуры $i \in X$, полученные по своей шкале E^ξ ;

C_1, C_2, \dots, C_m – упорядоченные классы равноценных градаций шкал E^ξ , $\xi = \overline{1, \alpha}$.

Задача ранжирования заключается в построении такого разбиения множества X на классы $K_1, \dots, K_i, \dots, K_e$ равноценных альтернатив, где альтернативы из класса K_i строго предпочтительнее альтернатив из классов K_{i+1}, \dots, K_e для любого $i = 1, 2, \dots, e - 1$, и состоит из нескольких этапов.

Этап 1. Построение обобщенных оценок альтернатив:

$$\tilde{U}(i) = \sum_{\xi=1}^{\alpha} \sum_{k=1}^m p_{jk}^\xi u_\xi(e_k^\xi) = \sum_{j=1}^m u_j \left(\sum_{\xi, k: x_k^\xi \in C_j} p_{jk}^\xi \right). \tag{11}$$

Этап 2. Для каждой пары альтернатив $i, j \in X$ решается следующая задача:

$$\sum_{s=1}^m \sum_{e=1}^m h_{se} |\tilde{u}_s(e_s) - \tilde{u}_e(e_e)| \rightarrow \min; \tag{12}$$

$$\sum_{e=1}^m h_{se} = p_s^i, \sum_{s=1}^m h_{se} = p_s^j, h_{se} \geq 0, s, e = \overline{1, m}; \quad (13)$$

$$h_{ss} = \min(p_s^i, p_s^j) \quad s = \overline{1, m}; \quad (14)$$

и определяются оценки

$$R_{i \sim j} = \sum_{s=1}^m h_{se}^*, R_{ij} = \sum_{s < e} h_{se}^*, R_{ji} = \sum_{s > e} h_{se}^*; \quad (15)$$

где $h^* = (h_{se}^*)_{m \times m}$ – матрица, определяющая оптимальное решение задачи.

Далее вычисляется матрица парных сравнений $r = (r_{ij})$:

$$r_{ij} = R_{ij} + \frac{1}{2} R_{i \sim j}, \text{ для } \forall i, j \in X, i \neq j. \quad (16)$$

Этап 3. Решается задача аппроксимации нечеткого отношения R и определяется нечеткая квазисерия \hat{T} , аппроксимирующая нечеткое отношение предпочтения, задаваемое матрицей r .

Этап 4. На основе квазисерии \hat{T} строится итоговое ранжирование альтернатив с помощью процедуры выделения классов эквивалентных объектов и упорядочения классов.

То есть на основе перечисленной выше исходной информации строится обобщенная шкала, вычисляются обобщенные оценки альтернатив, строится на основе этих оценок бинарное нечеткое отношение предпочтения, а затем находится ближайшая к нему нечеткая обратимая квазисерия. Множество возможных ситуаций с предпочтительными структурами СЭ СТС формируют базу ситуаций на текущем интервале планирования.

На этапе апостериорного адаптивного ситуационного выбора структуры СЭ СТС решается задача идентификации текущей ситуации и выбора ближайшей ситуации к текущей из базы ситуаций. Для этого четкие оценки элементов эталонной ситуации преобразуются в нечеткие оценки вырожденного типа. Далее задается нечетко-лингвистическая шкала, формируется обобщенная экспертная оценка текущей ситуации и определяется расстояние между эталонной и текущей ситуациями. В основу решения задачи идентификации текущей ситуации и выбора ближайшей ситуации к текущей из базы ситуаций положен *метод идентификации класса текущей ситуации на основе минимизации расстояния между эталонной и текущей ситуациями* [8].

Исходной информацией метода является база ситуаций с эталонными ситуациями и частные нечеткие оценки текущей ситуации:

$$Sit_m^{этал} = \langle \mu_{1m}(G_1), \dots, \mu_{nm}(G_n), \mu_{2m}(G_1), \dots, \mu_{mm}(G_m), \dots, \mu_{4m}(G_1), \dots, \mu_{km}(G_k) \rangle; \quad (17)$$

$$Sit_j^{мек} = \langle \mu'_{1j}(G_1), \dots, \mu'_{nj}(G_n), \mu'_{2j}(G_1), \dots, \mu'_{mj}(G_m), \dots, \mu'_{4j}(G_1), \dots, \mu'_{kj}(G_k) \rangle. \quad (18)$$

Рассмотрим этапы идентификации класса текущей ситуации.

Этап 1. Преобразование четких оценок элементов эталонных ситуаций к нечетким оценкам вырожденного типа (рис. 2, 3):

$$1) a = \mu_a(x) = \begin{cases} 1, x = a \\ 0, x \neq a \end{cases}; \quad (19)$$

$$2) c = (a, b) = \mu_c(x) = \begin{cases} 1, a \leq x \leq b \\ 0, \text{ иначе} \end{cases}. \quad (20)$$

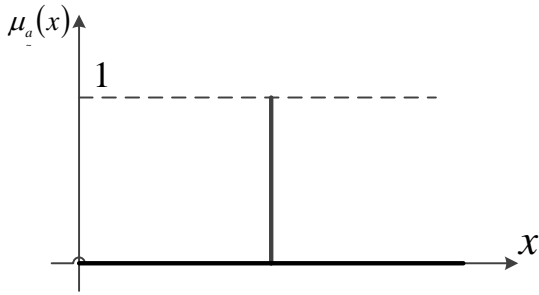


Рис. 2. Факторное пространство четкой точечной оценки

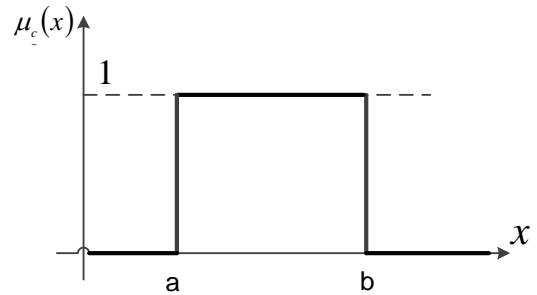


Рис. 3. Факторное пространство четкой интервальной оценки

Этап 2. Задание типа нечетко-лингвистической шкалы (НЛШ) (рис. 4) для измерения i -го параметра j -го класса текущей ситуации $x_{i,j}$:

$$x_{\sim 1,j,l} = \mu_{T_{\text{нлш}}^l}(x), \tag{21}$$

- где $x_{\sim 1,j,l}$ – нечеткая оценка l -го эксперта по НЛШ;
 $T_{\text{нлш}}^l$ – терм НЛШ l -го эксперта;
 l – номер эксперта.

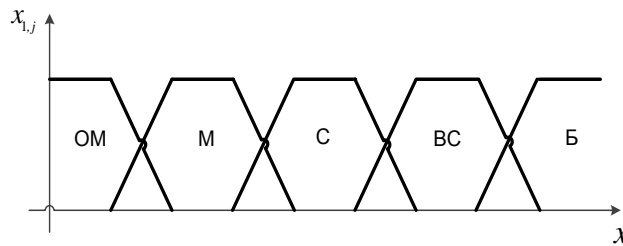


Рис. 4. Нечетко-лингвистическая шкала

Этап 3. Формирование обобщенной экспертной оценки параметров текущей ситуации:

$$\bar{x}_{\sim i,j} = \frac{\sum_{l=1}^L \left(x_{\sim i,j,l} \right) \alpha_l}{L}; \tag{22}$$

- где $\bar{x}_{\sim i,j}$ – средняя экспертная оценка;
 α_l – коэффициент компетентности l -го эксперта;
 L – общее количество экспертов.

Этап 4. Определение расстояния между эталонной и текущей ситуациями:

$$R_{jk}^* = \min_{\substack{m=1,M \\ m \neq j}} R_{jm}; \tag{23}$$

$$R_{jm} = \sqrt{\int_0^1 |\mu_{1j}(x_1) - \mu_{1m}(x_1)|^2 dx_1} + \sqrt{\int_0^1 |\mu_{2j}(x_2) - \mu_{2m}(x_2)|^2 dx_2} + \dots + \sqrt{\int_0^1 |\mu_{kj}(x_k) - \mu_{km}(x_k)|^2 dx_k}. \tag{24}$$

В данном методе учет неполноты информации о текущей ситуации осуществляется введением нечеткого вектора оценок ее параметров, что позволяет использовать дополнительную информацию о ситуации в виде экспертных знаний и снизить временные и материальные за-

траты на сбор и обработку исходных данных о текущей ситуации. Результатом решения этой задачи является ближайшая ситуация из базы ситуаций к текущей ситуации. При этом в качестве рекомендуемой структуры СЭ СТС для текущей ситуации принимается предпочтительная структура, определенная на этапе априорного анализа для ближайшей ситуации.

При необходимости множество типовых ситуаций и множество предпочтительных вариантов структур СЭ СТС для них корректируется путем добавления новых элементов и связей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемая концепция является решением проблемы оперативного обеспечения требуемой готовности в изменяющейся обстановке на основе заранее подготовленных вариантов управляющих воздействий для возможных вариантов развития обстановки. При этом заранее определенные оптимальные варианты структуры СЭ СТС для каждой из типовых ситуаций управления, исходя из предполагаемого развития событий, а также оперативное их применение позволят существенно снизить время принятия решения и облегчить его формирование в условиях временных и ресурсных ограничений.

Список используемых источников

1. Выступление генерала армии Шойгу С.К. на открытом заседании Коллегии Министерства обороны Российской Федерации от 31 мая 2021 года. – URL: <https://rg.ru/turbopages.org/rg.ru/s/2021/05/31/shojgu-rasskazal-o-narastanii-voennyh-ugroz-na-zapadnom-napravlenii.html> (дата обращения: 25.04.2022).
2. *Лаврищев А. А.* Военная энциклопедия: в 8 т. – М.: Воениздат, 2003. – Т. 1. – 493 с.
3. Выбор мест размещения наземных оптических средств наблюдения на основе нечетко-возможностной модели / В. В. Лисицкий [и др.] // Мягкие измерения и вычисления. – 2021. – № 40(3). – С. 19–30.
4. *Миронов А. Н., Лисицкий В. В., Столбов А. В.* Математические основы решения многокритериальных оптимизационных задач синтеза сложных иерархических организационно-технических систем // Нелинейный мир. – 2020. – Т. 18, № 3. – С. 5–17.
5. *Лисицкий В. В., Ворона С. Г., Мартынов А. М.* Полимодельный комплекс предъявления требований к качеству сложной технической системы на различных этапах жизненного цикла // Успехи современной радиоэлектроники. – 2022. – Т. 76, № 10 – С. 22–28.
6. *Лисицкий В. В., Миронов А. Н.* Метод многокритериальной нелинейной оптимизации сложных организационно-технических систем на основе минимизации невязок в условиях временных ограничений // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – № 1. – С. 330–343.
7. *Миронов А. Н., Лисицкий В. В.* Метод решения многокритериальной оптимизационной задачи синтеза СТС в условиях нечёткой информации // Научно-методический сборник трудов научно-технической конференции «Перспективы развития и применения стратегических оборонительных систем». – М.: ЦНИИ ВВКО, 2019. – Ч. 1. – С. 127–138.
8. Метод распределения ресурсов при эксплуатации сложной технической системы / В. В. Лисицкий [и др.] // Вестник Российского нового университета. Сер.: Сложные системы: модели, анализ и управление. – 2020. – № 1. – С. 71–79.

И. К. Миляев;
А. Г. Тарасов,
доктор технических наук, доцент

ПОДХОД К АНАЛИЗУ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ КОСМОДРОМА

Автоматизированные комплексы в рамках системы информации о техническом состоянии космических средств (КСр) используются на этапе сбора, обработки и передачи информации, а этап непосредственного анализа результатов обработки информации о техническом состоянии и эффективности выполнения целевых задач выполняется практически вручную. В статье предлагается концепция построения автоматизированной системы обработки информации на базе единого информационного пространства.

Ключевые слова: мониторинг технического состояния, единое информационное пространство, интеграция данных, экономическая эффективность.

ВВЕДЕНИЕ

Ключевой особенностью автоматизированных комплексов мониторинга технического состояния и надежности систем и агрегатов КСр является то, что данные комплексы осуществляют прогнозирование развития ситуации, по результатам которого принимают превентивные меры по парированию прогнозных отклонений, т. е. реализуют технологию проактивного управления.

В целях повышения точности прогноза развития той или иной ситуации необходимо обеспечить полную и достоверную информацию по испытаниям КСр на всех этапах жизненного цикла, для чего требуется обеспечить единство всей имеющейся на момент испытания информации об объекте мониторинга (результаты моделирования функционирования КСр в различных условиях обстановки, результаты заводских, стендовых, летных испытаний и штатной эксплуатации КСр, результаты проведенных исследований для определения причин отказов и неисправностей) и другой информации, которую необходимо аккумулировать в единую автоматизированную базу данных и знаний.

СУЩЕСТВУЮЩАЯ СИСТЕМА ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АСУ

В процессе подготовки ракеты космического назначения (РКН) «Ангара» на техническом (ТК) и универсальном стартовом комплексах (УСК) (рис. 1) значительную роль выполняют автоматизированная система управления подготовкой (АСУ) ракеты-носителя (РН) и разгонного блока (РБ) (АСУП РН (РБ)) 14И277, разработки специализированного конструкторского бюро (СКБ) «Орион», и автоматизированная система управления технологическим оборудованием (АСУ ТО) 14Г630, разработки СКБ «Титан».

АСУП РН (РБ), разработки СКБ «Орион», и АСУ ТО, разработки СКБ «Титан», обеспечивают управление технологическими процессами подготовки РН и РБ, а также пуска РКН на ТК и УСК. Однако данные системы разработаны на абсолютно разной аппаратной платформе, они используют SCADA-системы различных производителей для отображения и контроля текущего состояния технологического оборудования, различные форматы регистрации и архивирования информации.

Таким образом, текущее положение дел в информационном обеспечении создания, применения и эксплуатации автоматизированных систем подготовки и пуска (АСПП) ракеты космического назначения (РКН) характеризуется фрагментарной автоматизацией технологических и управляющих процессов, несогласованностью и низким уровнем информационного обмена между системами разных уровней иерархии, несовместимыми между собой информационными системами, разработанными на разных платформах, слабым уровнем автоматизации обработки информации о техническом состоянии и эффективности выполнения целевых задач.

Эта ситуация приводит к низким возможностям по оптимизации технологического цикла проектирования, производства и эксплуатации КСр вследствие целого ряда причин, оказывающих качественное влияние на процессы принятия управленческих решений [1–3] в военных учреждениях и промышленных предприятиях (рис. 2).



Рис. 2. Анализ выявленных недостатков в работе автоматизированных систем космодрома

Важнейшим объектом информационной инфраструктуры космодрома является распределенная АСУ (рис. 3), главными задачами которой в ходе пусковых кампаний являются [4]:

- интеграция информационных потоков по ракете-носителю, разгонному блоку, полезной нагрузке (КА), объектам технического и стартового комплексов, а также смежных информационных систем в реальном масштабе времени;
- управление в реальном масштабе времени технологическими процессами подготовки к пуску на техническом и стартовом комплексах;
- формирование и выдача управляющих воздействий на объекты управления, а также выработка рекомендаций на автоматизированные рабочие места (АРМ) номеров расчета и взаимодействующие с АСУ системы;

- обеспечение безопасности проведения работ, контроль эвакуации персонала расчетов при проведении пуска РКН;
- формирование заключений о контролируемых параметрах и обеспечение информационной поддержки при принятии решения на проведение подготовки и пуска РН «Союз-2»;
- мониторинг функционирования бортовых систем и агрегатов РН на активном участке траектории полета;
- оперативное формирование отчетной документации, отображение результатов оценки контролируемых параметров в реальном масштабе времени на средствах отображения информации АСУ.

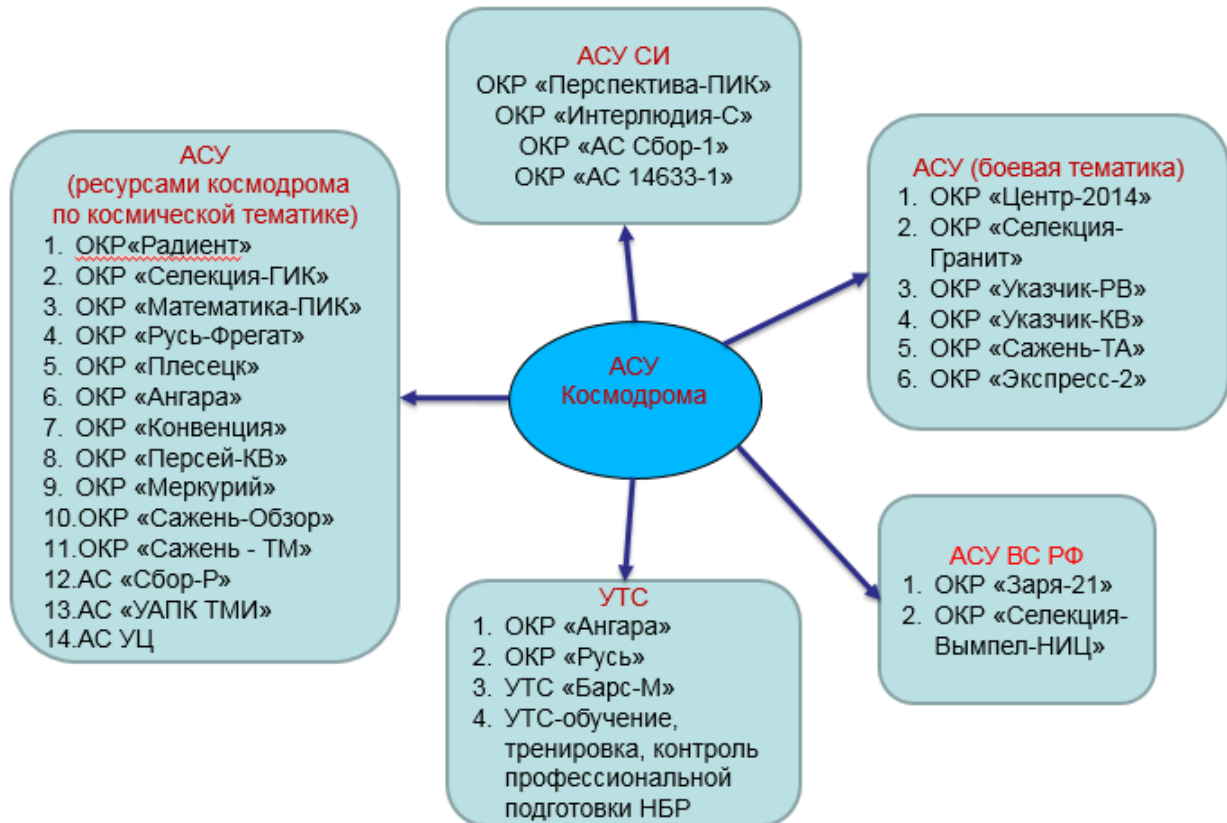


Рис. 3. Автоматизированные системы управления космодромом

При существующей системе автоматизации управления технологическими процессами подготовки и пуска РКН с использованием разнообразных аппаратно-программных платформ АСУ ТП и АСУ ПП крайне сложно обеспечить комплексную автоматизацию всех рассматриваемых процессов. Таким образом, построенная с привлечением большого количества предприятий изготовителей АСУ космодрома с использованием разнообразных аппаратно-программных платформ, имеет такие недостатки как избыточность аппаратно-программных средств, низкую надежность, значительную стоимость разработки и эксплуатации.

ПЕРСПЕКТИВНАЯ СИСТЕМА КОМПЛЕКСНОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ПОДГОТОВКОЙ И ПУСКОМ РКН

Разработка и внедрение АСПП РКН на базе интеграции информационных потоков по ракете-носителю, разгонному блоку, полезной нагрузке, объектам технического и стартового комплексов, а также смежных информационных систем позволит сократить количество аппаратно-программных средств, численность персонала, унифицировать структуры построе-

ния аппаратных и разработки программных средств, что в итоге приведет к значительному сокращению затрат на эксплуатацию АСПП РКН [2].

Эффективное решение задач, возложенных на АСПП РКН, возможно только лишь при наличии достоверной и полной информации обо всех параметрах технологических процессов и систем. Для реализации технологии проактивного управления оценивание технического состояния КСр должно проводиться с использованием данных не только текущего временного сечения, но и данных за некоторый (иногда достаточно большой) временной интервал, предшествующий текущему моменту. При этом проактивное управление объектами, в отличие от традиционно используемого реактивного управления, ориентированного на оперативное реагирование и последующее недопущение возможных нештатных и аварийных ситуаций, предполагает предотвращение возникновения указанных ситуаций за счет создания в соответствующей системе управления принципиально новых прогнозирующих и упреждающих возможностей при формировании и реализации управляющих воздействий, базирующихся на методах и технологиях системного (комплексного) моделирования.

Методология проактивного управления выявляет инициирующие события, формирование и реализацию управляющих воздействий, направленных на парирование не следствий, а причин, вызывающих возможные нештатные, аварийные и кризисные ситуации в объекте управления. Анализ современных АСУ показал, что в них реализованы технические средства контроля и управления, фиксирующие последствия нештатных и аварийных ситуаций и обеспечивающие реактивное управление. Для реализации методологии проактивного управления необходимо разрабатывать средства и методы выявления инициирующих событий, обеспечить необходимый объем информации об объекте управления.

Применение методологии проактивного управления направлено на решение следующих задач (рис. 4):

- задачи целенаправленного и обоснованного создания (расширения разнообразия в интеллектуальных системах управления, сужения разнообразия внешней среды);
- задачи декомпозиции (композиции), агрегирования (деагрегирования), координации, линеаризации, аппроксимации, релаксации при моделировании, анализе и синтезе адаптивных и самоорганизующихся интеллектуальных технологий и систем проактивного мониторинга и управления;
- задачи квалиметрии моделей и полимодельных комплексов, описывающих указанные технологии и системы.

Обеспечение АСПП РКН информацией для решения возложенных на нее задач по сбору, обработке и представлению информации, выработке и реализации управляющих воздействий является функцией единого информационного пространства и может быть реализовано путем создания системы комплексной автоматизации управления подготовкой и пуском РКН. Основными источниками информации для АСПП РКН являются:

- смежные системы (АСУ ТО СК, НИУКСИ, НАСУ, СИУЗ, КСИСО и др.);
- система безопасности и контроля;
- объекты инфраструктуры космодрома.

В связи со всем вышеизложенным, является актуальной интеграция информационной среды (PDM-систем, АС различного назначения, системы электронного документооборота, электронных фондов и пр.) предприятий ракетно-космической отрасли с информационной средой космодрома [5, 6]. Кроме того, не менее важен комплекс мероприятий по организационной и информационной интеграции с другими участниками кооперации, основанный на единых принципах и технологиях, реализуемый с использованием унифицированных программных платформ.

Система комплексной автоматизации управления подготовкой и пуском (КАУПП) РКН предполагает формирование единой системы данных и знаний, формируемых и изменяемых по общим определенным правилам и доступных уже функционирующим в организациях различным автоматизированным системам (рис. 5).

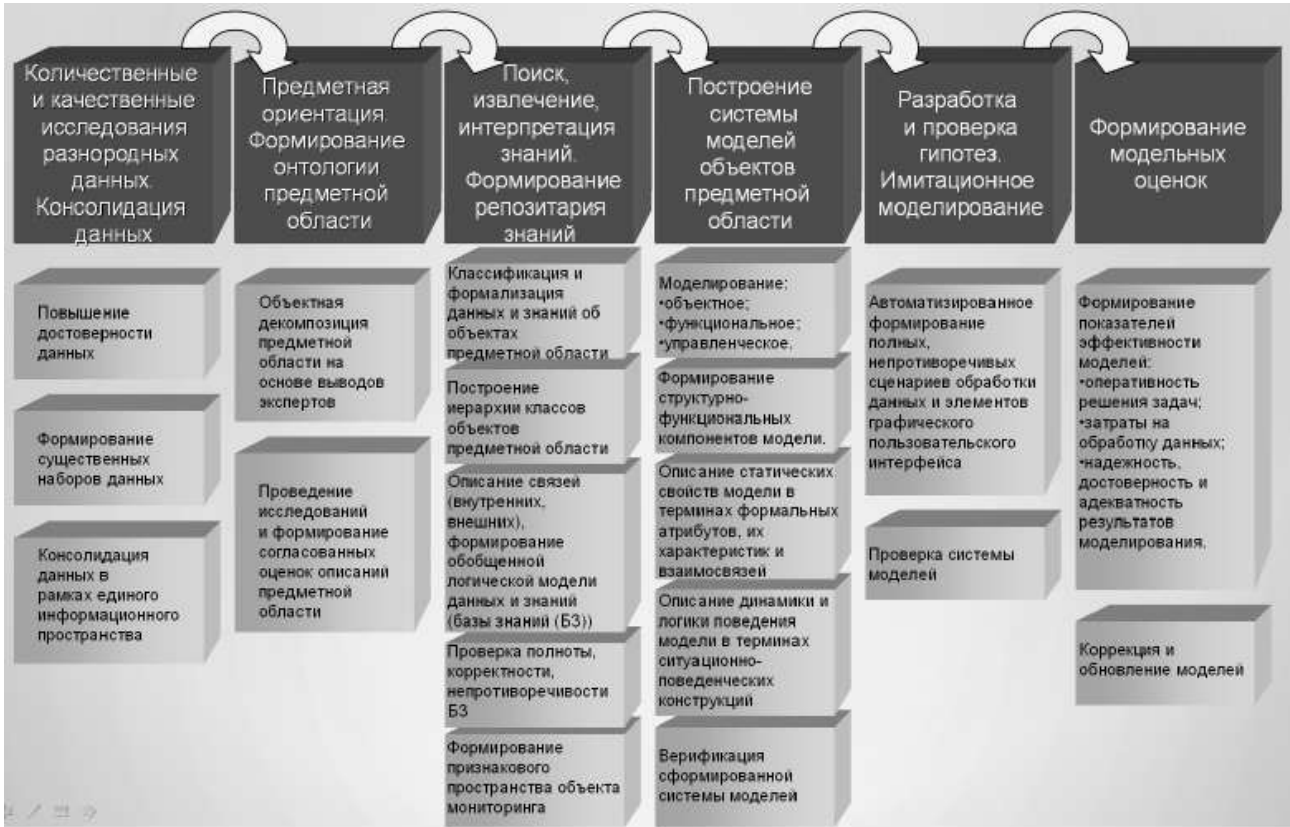


Рис. 4. Задачи проактивного управления КСр на различных этапах жизненного цикла



Рис. 5. Концептуальная модель системы

Экономическую эффективность системы КАУПП РКН предлагается оценить по соотношению «результат – затраты». Для этого необходимо определить затраты на внедрение информационных технологий. Показатель функциональной эффективности [7] с учетом ключевых аспектов решаемой задачи определяется по формуле:

$$E^{\text{АСИАО}} = v_1 Ver^{\text{АСИАО}} + v_2 Eff^{\text{АСИАО}} + v_3 F^{\text{АСИАО}},$$

где $Ver^{\text{АСИАО}}$ – показатель достоверности полученных результатов;
 $Eff^{\text{АСИАО}}$ – показатель оперативности полученных результатов;
 $F^{\text{АСИАО}}$ – показатель реализуемости единого информационного пространства заинтересованных организаций, включаемых в состав системы КАУПП РКН, рассчитываемый по формуле:

$$F^{\text{АСИАО}} = w_1 F^{\text{пр}} + w_2 F^{\text{инт}} + w_3 F^{\text{неиз}} + w_4 F^{\text{хрон}},$$

где $F^{\text{пр}}$ – показатель предметной ориентированности программ;
 $F^{\text{инт}}$ – показатель интегрированности информационных ресурсов и программ;
 $F^{\text{неиз}}$ – показатель неизменчивости распределенного информационного хранилища;
 $F^{\text{хрон}}$ – показатель поддержки хронологии и каталогизации электронных дел изделий в рамках хранилища;
 w_1, w_2, w_3, w_4 – веса, характеризующие ценность частных показателей реализуемости единого информационного пространства и задаваемые экспертным опросом [8].

v_1, v_2, v_3 – веса, характеризующие ценность частных показателей функциональной эффективности.

Для определения возможного сокращения издержек от использования системы КАУПП РКН составим экономико-математическую модель, оценивающую стоимость системы с учетом факторов риска и неопределенности. Экономия от сокращения технического персонала рассчитывается по формуле [9]

$$\mathcal{E}_{\text{АСИАО}} = \sum_{i=1}^n Y_i W_i,$$

где Y_i – количество высвобождаемого технического персонала i -го субъекта внедрения ($i = 1, 2, \dots, n$);

W_i – величина дохода на одного высвобождаемого сотрудника.

При рассмотрении экономии затрат в результате внедрения системы КАУПП РКН, индекс прибыльности может быть рассчитан по формуле

$$I_{\text{АСИАО}} = 1/Z \sum_{t=0}^T (\mathcal{E}_t - Z_t^*) \frac{1}{(1+r)^t},$$

где Z – суммарные затраты на внедрение системы;

\mathcal{E}_t – экономия в период t ;

Z_t^* – затраты в период t ;

r – процентная ставка, используемая для пересчета будущих доходов в единую величину текущей стоимости, отражающая временную стоимость денег;

t – период времени ($t = 1, \dots, T$).

Реализация комплекса мероприятий по организационной и информационной интеграции автоматизированных систем различного назначения, систем электронного документооборота, электронных фондов предприятий ракетно-космической отрасли с информационной средой космодрома позволит значительно перераспределить расходы на проектирование, разработку и эксплуатацию КСр (рис. 6).



Рис. 6. Распределение расходов по этапам жизненного цикла изделия с применением информационных технологий

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из полученных ранее результатов следует, что разработка и применение системы комплексной автоматизации процессов мониторинга и управления на всех этапах жизненного цикла КСр на основе единого информационного пространства позволяют [4–6]:

- сократить затраты временных ресурсов на проведение операций сбора, обработки информации и выполнения расчетно-аналитических задач до 80% за счет автоматизации этих процессов и функционирования в реальном масштабе времени;
- повысить обоснованность принимаемых решений до 50% за счет сокращения информационной нагрузки на ЛПР, предоставления ему наиболее полной, достоверной и качественной информации, необходимой для принятия решений;
- сократить количество ошибок в результатах обработки до 98% за счет формализации, согласования и систематизации исходных данных с помощью специализированных программных средств подготовки исходных данных и знаний;
- повысить степень интегрированности и согласованности информационных потоков и ресурсов на уровне структур данных и методов их обработки, и за счет этого повысить оперативность доступа к таким данным до 40–50%;
- повысить оперативность составления планов за счет реализации моделей многовариантного планирования и упреждения нештатных ситуаций (методология проактивного управления) до 70%;
- по крайней мере, в 2 раза повысить оперативность проектирования информационной системы и оперативность подготовки исходных данных за счет применения современных научно-методологических и технических разработок в сфере искусственного интеллекта;
- сократить длительность цикла разработки и внедрения информационной системы в 10–15 раз;
- исключить до 80–85% искажений в разнородных исходных данных за счет автоматизированных средств верификации, валидации и трассировки.

Список используемых источников

1. Применение технологии поддержки принятия решений на различных этапах жизненного цикла космических средств в составе системы информации о техническом состоянии и надежности / П. Н. Автамонов [и др.] // Материалы V Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» (V Козловские чтения) / под общ. ред. А. Н. Кирилина. – Самара: ЦСКБ-Прогресс, 2017. – С. 222–233.
2. Концепция создания и применения перспективной АСУ подготовки и пуска ракеты космического назначения «Союз-2»: новые подходы к интеграции, интеллектуализации, управлению / Р. Н. Ахметов [и др.] // Авиакосмическое приборостроение. – 2015. – № 4. – С. 3–54.
3. *Каргин В. А., Майданович О. В., Охтилев М. Ю.* Автоматизированная система информационной поддержки принятия решений по контролю в реальном времени состояния ракетно-космической техники // Известия вузов. Приборостроение. – 2010. – Т. 53, № 11. – С. 20–23.
4. Междисциплинарный подход к оцениванию и анализу эффективности информационных технологий и систем / О. В. Майданович [и др.] // Известия вузов. Приборостроение. – 2010. – Т. 53, № 11. – С. 7–16.
5. Унифицированная информационная технология мониторинга динамически изменяющихся состояний космических средств и средств НКУ на основе измерительной информации и представления его результатов на индивидуальных и коллективных средствах отображения / М. Ю. Охтилев [и др.] // Авиакосмическое приборостроение. – 2007. – № 5. – С. 20–24.
6. *Охтилев П. А.* Интеллектуальный комплекс автоматизированного проектирования систем информационно-аналитической поддержки жизненного цикла сложных объектов // Известия вузов. Приборостроение. – 2018. – Т. 61, № 11. – С. 963–971.
7. *Юсупов Р. М., Мусаев А. А.* Особенности оценивания эффективности информационных систем и технологий // Труды СПИИРАН. – 2017. – № 51. – С. 5–34.
8. *Александров Б. Ю.* Современные подходы к анализу эффективности функционирования предприятий в условиях неопределенности // Экономика и управление в машиностроении. – 2012. – № 1. – С. 6–14.
9. *Васильева Е. В., Деева Е. А.* Оценка экономической эффективности конкурирующих ИТ-проектов: подходы и математический инструментарий // Управление. Вызовы и угрозы. – 2017. – № 4 (18). – С. 40–46.

Л. А. Иноземцева;
Н. С. Кужекин,
кандидат философских наук, профессор

АКМЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИНВАРИАНТЫ В СТРУКТУРЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ КОМПЕТЕНТНОСТИ ПРЕПОДАВАТЕЛЯ ВОЕННО-УЧЕБНОГО ЗАВЕДЕНИЯ

В публикации рассматриваются актуальные проблемы формирования акмеологических инвариантов как ключевого компонента профессиональной компетентности профессорско-преподавательского состава военно-учебного заведения, предлагается один из вариантов подготовки выпускников адъюнктуры к педагогической деятельности в условиях изменения подхода к подготовке научных и научно-педагогических кадров в адъюнктуре.

Ключевые слова: профессиональная компетентность, акмеологические инварианты, профессиональное совершенствование, профессиональная переподготовка, повышение квалификации, педагогическая культура.

Успешность образовательной деятельности военно-учебного заведения во многом обусловливается профессиональной компетентностью его профессорско-преподавательского состава.

В трудах представителей отечественной педагогики, таких как В. Г. Михайловский, В. А. Барабанщиков, А. А. Деркач и др., традиционно уровень профессиональной компетентности определяется категориями «педагогическая культура», «педагогическое мастерство» и «педагогическое творчество» [1, 5]. Переход к компетентностному подходу детерминирует описание уровня профессиональной компетентности в категориях компетентностного подхода. Ключевым понятием в рамках подхода становится понятие «компетенция» как способность эффективно осуществлять профессиональную деятельность на основе приобретенных знаний, умений и практического опыта, сформированного в процессе обучения в высшей школе. Так, обучение по программе профессиональной переподготовки направлено на формирование способности организовывать образовательную деятельность на основе современных достижений психолого-педагогической науки и практики, образовательных технологий, методов и средств в конкретной отрасли знания и предметной области с целью обеспечения планируемого уровня личностного и профессионального развития обучающихся и др. Целью обучения в адъюнктуре является формирование способности применять фундаментальные знания военной науки, современные средства и методы обучения и управления образовательным процессом, приобретать новые знания и практический опыт; способности использовать в педагогической деятельности новые образовательные и информационные технологии; способности применять методологию научно-исследовательской деятельности в соответствии с направленностью подготовки и др.

В своих работах И. А. Зимняя, А. К. Маркова, Н. В. Кузьмина, Н. В. Андропова, исследуя понятие «профессиональная компетентность», выделяют перечень профессиональных знаний, умений, профессионально-личностных качеств, которыми должен обладать преподаватель. Отдельные авторы, к числу которых относится Л. М. Митина, в своих исследованиях указывают на более чем 50 профессионально важных качеств педагога [3, 4].

Авторы данной статьи ранее также обращались к проблеме профессиональной компетентности преподавателя военно-учебного заведения, характеризуя ее как сложное многогранное понятие, включающее мотивационную, теоретическую и практическую подготовленность к осуществлению педагогической деятельности [2].

Вместе с тем многие вопросы профессиональной компетентности профессорско-преподавательского состава остаются нерешенными. Прежние программы обучения в адъюнктуре и подразделениях дополнительного профессионального образования, разработанные в соответствии с Федеральными государственными образовательными программами высшего образования, реализовывались в целях приобретения необходимых для осуществления профессиональной деятельности компетенций преподавателя-исследователя: научно-исследовательской, инновационной, педагогической деятельности в сфере высшего образования и т. д. Федеральные государственные требования к структуре подготовки научных и научно-педагогических кадров в адъюнктуре устанавливают исключительно научно-исследовательскую деятельность (диссертации) и подготовку выпускников к защите научно-квалификационной работы [6, 7]. Тем не менее, основное их предназначение, как правило, – осуществление педагогической деятельности в качестве преподавателя, или научной – в качестве сотрудника ВИ(НИ). Таким образом, возникает противоречие между необходимостью профессиональной педагогической подготовки офицеров, назначаемых на преподавательские должности и возможностями программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в адъюнктуре. Как разрешить данное противоречие? Речь идет о поиске новых моделей подготовки военно-педагогических кадров.

Авторы считают, что предпочтительным вариантом подготовки к преподавательской деятельности является освоение выпускниками адъюнктуры программы профессиональной переподготовки к новому виду деятельности в сфере педагогики высшей военной школы. Несмотря на непродолжительный срок освоения программы (до 12 недель), возможно подготовить преподавателя к осуществлению стабильной, эффективной и надежной педагогической деятельности. Индикатором подготовленности, по нашему мнению, могут выступать акмеологические инварианты профессиональной компетентности.

Под акмеологическими инвариантами понимаются профессионально важные качества, умения и компетенции, обеспечивающие стабильную эффективность и надежность выполняемой деятельности, а также творческое саморазвитие и самосовершенствование преподавателя.

В педагогической литературе данной проблематике были посвящены труды А. А. Деркача, В. Г. Зазыкина, Н. А. Рыбникова и др. [1]. Опираясь на их методологический подход, наряду с общими акмеологическими инвариантами профессиональной компетентности, не зависящими от профессиональной специфики деятельности, выделяем и специальные инварианты, отражающие специфику профессионально педагогической деятельности преподавателя военно-учебного заведения, т. е. те знания, умения и способности, которые должны быть сформированы в процессе освоения программы профессиональной переподготовки к новому виду деятельности.

К общим для педагогической деятельности акмеологическим инвариантам, как правило, относят следующие:

- психологическую зрелость, сочетающую в себе набор профессиональных и личностных качеств, требуемых для осуществления продуктивной педагогической деятельности;
- педагогическую интуицию и способность к точному прогнозированию ситуаций;
- педагогическое мышление, выражающееся в способности к анализу педагогических ситуаций и принятии оптимального педагогического решения с опорой на индивидуальные особенности обучающихся;
- высокую креативность и устойчивую положительную мотивацию;
- педагогические умения: умение структурировать и перерабатывать учебный материал; умение комбинировать методы и формы обучения и воспитания; умение осуществлять поиск новых педагогических задач и использовать инновационные технологии и методы обучения; умение изучать индивидуальные особенности (психические познавательные процессы, состояния и др.) и развивать личность обучающихся; умение оценивать свои профессионально-личностные качества; умение планировать и реализовывать программу своего

личностного и профессионального саморазвития; умение подвергать анализу достоинства и недостатки своей деятельности, особенности своего индивидуального педагогического стиля; умение поддерживать высокую работоспособность и др.

Вместе с тем преподаватель военно-учебного заведения должен обладать специальными знаниями, обуславливающими его профессиональную компетентность, военно-профессиональными знаниями. От преподавателя военно-учебного заведения требуются широкая общая и военная эрудиция, отличная теоретическая подготовка на уровне новейших достижений соответствующих областей военной науки, военного законодательства, уставов, руководящих документов; знание теории и практики военно-политической работы, представление об основных методах психодиагностики личности слушателей и курсантов, а также воинского коллектива; психолого-педагогические знания об особенностях формирования и жизнедеятельности воинского коллектива; знание методики организации и осуществления учебного процесса, передовых методов и форм проведения учебных занятий. Военный преподаватель должен обладать высокими морально-боевыми и организаторскими качествами, педагогической требовательностью, высокой педагогической культурой.

В соответствии с набором акмеологических инвариантов профессиональной компетентности должны определяться требования к структуре и содержанию программы подготовки преподавателей. Теоретическая подготовка является своеобразной платформой обеспечения и повышения уровня правовой, методической, научной и психолого-педагогической подготовленности преподавателей, и включает систему знаний, формируемых учебными дисциплинами программы переподготовки – знания в области государственной политики, законодательства и нормативной базы системы образования («Нормативно-правовые основы системы военного образования»), знания о психолого-педагогических основах образовательного процесса, индивидуально-психологических особенностях преподавателя и обучающихся («Педагогическая психология»), знания об актуальных проблемах обучения и воспитания, инновационных подходах к учебно-воспитательному процессу и современных образовательных технологиях в военно-учебном заведении («Психология и педагогика высшей военной школы»), знания технологии организации образовательного процесса и методики преподавания учебных дисциплин («Технологии профессионально-ориентированного обучения»), знания о методических аспектах использования электронной образовательной среды в процессе обучения («Электронные образовательные и информационные ресурсы»).

Практическая подготовка к осуществлению педагогической деятельности направлена на выработку профессионально важных качеств преподавателя и педагогических умений, таких как умение непрерывно совершенствовать военно-профессиональную деятельность, умение творчески использовать полученные знания и навыки в решении профессиональных задач, коммуникативные умения, необходимые для эффективного управления слушателями и курсантами, умение качественно анализировать собственную деятельность и принимать обоснованные решения и т. д.

Педагогические умения и способности развиваются в процессе обучения и определяются педагогическими образовательными технологиями. На кафедре имеется значительный опыт реализации хорошо зарекомендовавших себя образовательных технологий, которые могут быть предложены в новой программе подготовки профессорско-преподавательского состава. Так, технология проблемного обучения, используемая профессорско-преподавательским составом кафедры, позволяет слушателям усваивать новые знания посредством разрешения проблемных ситуаций, как практического, так и теоретического характера. Личностно-ориентированные технологии позволяют адаптировать учебный процесс к индивидуальным особенностям слушателей, обозначить индивидуальную траекторию профессионально-личностного развития. Интерактивные технологии реализуют способ взаимодействия преподавателя со слушателями и курсантами в режиме диалога посредством доминирования активности обучающихся в процессе обучения (деловые и ролевые игры, дискуссии, тренинги и др.) и т. д.

Военно-учебные заведения, в том числе академия им. А. Ф. Можайского, располагают факторами, способствующими успешному формированию акмеологических инвариантов профессиональной компетентности. К основным из них относятся спланированный процесс профессионального становления назначенных на должность преподавателя, эффективная система наставничества в вузе, проведение научных исследований и защита диссертаций преподавателями, устойчивая система мотивации и стимулирования педагогического труда военных преподавателей.

В период профессионального становления вновь назначенные на должность преподавателя овладевают практическими навыками, необходимыми для самостоятельной организации учебной, методической и научной деятельности. В отношении начинающих преподавателей на данном этапе активно реализуется система планирования, способствующая планомерному вхождению в должность, успешной адаптации к коллективу кафедры и развитию профессионального мастерства.

Совместно с преподавателем-наставником разрабатывается план профессионального становления начинающего преподавателя, рассчитанный на два года и направленный на формирование и развитие навыков и умений педагогической работы с использованием достижений науки в своей предметной области, новых технологий и методик преподавания, приемов и методов воспитательной работы с обучающимися.

Существенными условиями успешного профессионального становления преподавателей выступают поэтапное освоение педагогической деятельности с постепенным повышением требований к начинающим преподавателям, качественная оценка их деятельности, эффективное функционирование и совершенствование системы наставничества на кафедре, организованная индивидуально-воспитательная работа.

Организованное профессиональное становление вновь назначенного преподавательского состава является важным условием формирования педагогического мастерства, это многоэтапный процесс создания положительной мотивации на ведение педагогической деятельности, формирования педагогической компетентности и профессионально важных качеств личности преподавателя.

Использование научно-исследовательской работы как инструмента совершенствования профессионального мастерства подразумевает вовлечение преподавателей в научную деятельность кафедры, учет их научных интересов, построение траектории научного роста, активное привлечение к участию в научных конференциях и публикационной активности. Научные исследования и защита диссертации являются важнейшим средством формирования педагогических компетенций, навыков обработки, систематизации и обновления информации, обеспечивающих высокий результат профессиональной деятельности. Поэтому для развития исследовательских навыков преподавателей на кафедрах вуза должны быть созданы условия для проявления их творческого потенциала.

Мотивационный компонент является основополагающим в системе акмеологических инвариантов профессиональной компетентности и обуславливается сплавом внешних и внутренних побуждений. Оптимальное сочетание средств и способов материального и нематериального стимулирования военных преподавателей позволяет качественно повысить продуктивность педагогической деятельности. Как показывает практика, наиболее эффективными методами формирования устойчивой мотивации к осуществлению педагогической деятельности являются:

- использование рейтинговых технологий оценки учебной, методической, научно-исследовательской деятельности профессорско-преподавательского состава (рейтинг преподавателя);
- благоприятный социально-психологический климат на кафедре, определяющий удовлетворенность в отношениях с коллегами, руководством, процессом самой деятельности и способствующий высоким достижениям профессиональной деятельности;

– обеспеченность профессиональной деятельности преподавателя материальными и техническими ресурсами, в том числе современными электронными средствами и технологиями, позволяющими реализовать набор информационных и других профессиональных компетенций;

– организация методической помощи преподавателям, содействие участию преподавателей в выполнении грантов, участии в конкурсах, публикационной активности и др.

Реализация на практике системы мотивации преподавателей не только повышает эффективность деятельности военно-учебного заведения, но и усиливает степень удовлетворенности работой педагогических работников, общий настрой, совершенствует качество труда.

Успешному формированию акмеологических инвариантов профессиональной компетентности содействует также инновационная образовательная среда военно-учебного заведения. В настоящее время инновационные изменения следуют в различных направлениях, среди которых отмечают создание новых программ обучения, разработку современных технологий обучения, применение приемов и методов освоения новых программ, создание условий для самоопределения слушателей и курсантов, создание индивидуальных и коллективных творческих инновационных проектов, участие в конкурсах научных работ, выставках, форумах и т. п. Готовность преподавателей к осуществлению инновационной деятельности подразумевает способность к своевременному и гибкому реагированию в своей профессиональной деятельности на постоянно изменяющиеся условия и потребности Вооруженных сил, технологий и реноваций информационной образовательной среды.

Таким образом, акмеологические инварианты профессиональной компетентности являются основой успешной, стабильной и эффективной педагогической деятельности. Точное определение и оптимальный выбор технологий их формирования – фундамент качественной образовательной деятельности, и, соответственно, успешности подготовки выпускников адъюнктуры к профессиональной педагогической деятельности в кафедральных коллективах военно-учебных заведений.

Список используемых источников

1. Акмеология: учебник / под общ. ред. А. А. Деркача. – М.: Изд-во РАГС, 2002. – 650 с.
2. Формирование готовности к педагогической деятельности в военно-учебном заведении при освоении программы профессиональной переподготовки педагогических работников / Н. С. Кужекин [и др.] // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 666. – С. 261–265.
3. Кузьмина Н. В. Акмеологическая теория фундаментального образования. – СПб.: Центр стратегических исследований, 2012. – 382 с.
4. Митина Л. М. Психология личностно-профессионального развития субъектов образования. – М.; СПб.: Нестор-История, 2014. – 376 с.
5. Михайловский В. Г. Акмеологические основы профессионального становления офицерских кадров. – М.: Изд-во РАГС/ВАД, 1995. – 260 с.
6. Об утверждении федеральных государственных требований к структуре программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре), условиям их реализации, срокам освоения этих программ с учетом различных форм обучения, образовательных технологий и особенностей отдельных категорий аспирантов (адъюнктов): приказ М-ва науки и высшего образования РФ № 195 от 20 окт. 2021 г. – М., 2021. – 18 с.
7. Об утверждении Положения о подготовке научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре): Постановление Правительства РФ № 2122 от 30 нояб. 2021 г. – М., 2021. – 18 с.

Н. В. Канивец*;

В. М. Крук*;

доктор психологических наук, профессор

*ВУ МО РФ, г. Москва.

ВЗАИМОСВЯЗЬ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПСИХОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ЛИЧНОГО СОСТАВА ДЕЖУРНЫХ СМЕН ПУНКТА УПРАВЛЕНИЯ СВЯЗЬЮ С ПСИХОЛОГИЧЕСКИМИ УСЛОВИЯМИ ЕЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ

Осуществлен анализ взаимосвязи показателей психологической подготовки личного состава пункта управления связью в деятельности должностных лиц с психологическими условиями ее совершенствования. Выявлены несоответствия в служебной деятельности должностных лиц органов управления соединений и воинских частей, а также уполномоченных должностных лиц (психологов) по совершенствованию системы психологической подготовки дежурных смен пунктов управления связью, в результате чего показатели психологической подготовки не имеют положительной динамики.

Ключевые слова: психологические условия, совершенствование психологической подготовки, должностные лица, оценка, средние значения, ситуативно-деятельностный компонент, когнитивный компонент, мотивационно-волевой компонент, метод последовательной динамической оценки, метод экспертной оценки.

Целенаправленные и согласованные действия должностных лиц войсковой части, а также психологов и внештатных психологов, назначенных приказом командира части, являются одним из важнейших внешних психологических условий совершенствования психологической подготовки личного состава дежурных смен пункта управления связью. При этом данная деятельность требует постоянного и непрерывного решения задач, направленных на учет результатов и выработку рекомендаций, уточнений. Также непрерывно должна проводиться работа по совершенствованию психологической подготовки личного состава.

В качестве достаточных показателей психологической подготовки определены психическая готовность, психическая устойчивость и профессионализм. Был произведен систематический учет этих показателей, они были проанализированы для различных временных отрезков.

Полученный эмпирический массив данных позволил судить о выраженности показателей психологической подготовки личного состава дежурных смен пункта управления связью, об изменении уровней психической готовности, психической устойчивости и профессионализма. Анализ полученных данных показывает, что отсутствует тенденция к совершенствованию психологической подготовки личного состава дежурных смен пункта управления связью.

На данном этапе рабочая гипотеза заключается в том, что показатели психологической подготовки не обнаруживают устойчивой тенденции к положительной динамике в связи с тем, что в служебной деятельности должностных лиц органов управления соединений и воинских частей, а также уполномоченных должностных лиц (психологов) работа по созданию психологических условий ее совершенствования ведется недостаточно эффективно.

В рамках предварительной подготовки проведено исследование (в течение одной недели) деятельности должностных лиц органов управления соединений и воинских частей, а также должностных лиц пункта управления связью с последующим анализом полученных результатов и совершенствованием методик и алгоритмов (инструментария) действий должностных лиц, благодаря чему весь применяемый инструментарий для всех участников исследования был стандартизирован.

В ходе пилотного (предварительного) исследования установлено, что характер задач, решаемых личным составом дежурных смен пункта управления связью, весьма разнообразен, отличается необходимостью быстрого реагирования и оперативного принятия решений. Трудности, связанные с психологической подготовкой личного состава, распределились следующим образом: 82% – при выполнении задач на боевом дежурстве, 18% – при осуществлении сопутствующих задач. Это свидетельствует о том, что психологическая подготовка имеет универсальный характер и одинаково важна для решения любых задач.

Далее в рамках проведения экспертного опроса участники ответили на все пункты анкеты по выявлению трудностей в деятельности должностных лиц органов управления соединений и воинских частей, а также уполномоченных должностных лиц по совершенствованию психологической подготовки и путей их преодоления. Оценка производилась по десятибалльной шкале.

После обработки полученного материала были сгруппированы кластеры трудностей в совершенствовании психологической подготовки личного состава дежурных смен пункта управления связью, в число которых вошли:

- ситуативно-деятельностный кластер, его содержанием стали деятельностные аспекты исследуемой проблемы;
- когнитивный кластер, который состоит в знании сущности и в понимании важности проблематики психологической подготовки и ее совершенствования;
- мотивационно-волевой кластер, включает в себя желание и настойчивость заниматься деятельностью по совершенствованию психологической подготовки;
- кластер конструктивности взаимодействия уполномоченных лиц;
- кластер психологической подготовки;
- кластер целенаправленности взаимодействия с другими полномочными и заинтересованными органами, организациями, лицами.

На первом месте в рейтинге трудностей оказался ситуативно-деятельностный кластер ($n = 91$), что подтвердило значимость такого направления деятельности. При этом анализ показал восемь типовых затруднений, с которыми сталкиваются должностные лица органов управления соединений и воинских частей в ситуациях, относящихся к проблематике психологической подготовки личного состава дежурных смен пункта управления связью.

На втором месте в рейтинге находился когнитивный кластер ($n = 68$), основу которого составили семь групп затруднений, подтверждающих недостаточную профессиональную подготовленность должностных лиц органов управления соединений и воинских частей, а также уполномоченных должностных лиц, в связи с ограниченным объемом выявленных остаточных знаний и навыков, необходимых для осуществления деятельности по совершенствованию психологической подготовки личного состава дежурных смен пункта управления связью.

На третьем месте в рейтинге оказался мотивационно-волевой кластер ($n = 44$), в состав которого вошли семь групп затруднений, свидетельствующих о недостаточно развитой личностно-профессиональной мотивации должностных лиц, недостаточно ответственном отношении и незаинтересованности деятельностью по совершенствованию психологической подготовки личного состава дежурных смен пункта управления связью. Проведенный анализ позволяет говорить о том, что проблемами, связанными с психологической подготовкой личного состава дежурных смен пункта управления связью, должны заниматься только специалисты-психологи и медицинские работники.

На четвертом месте в рейтинге расположился кластер конструктивности взаимодействия уполномоченных лиц ($n = 33$). Отнесенные к нему семь типовых трудностей определили круг возникающих при этом проблем.

Пятое место в рейтинге занял кластер психологической подготовки ($n = 32$). Шесть отнесенных к нему типовых трудностей в ряде случаев связаны с постоянной нехваткой военно-

служащих, допущенных к несению боевого дежурства, и невозможностью их отстранения на долгое время от несения боевого дежурства.

Довольно распространена практика конструктивного взаимодействия должностных лиц органов управления соединений и воинских частей с рядом руководителей органов местного самоуправления, организаций и фирм, расположенных вблизи соединений и воинских частей, по актуальным проблемам жизнедеятельности органов управления соединений и воинских частей. Таким образом, в кластер целенаправленного взаимодействия с другими полномочными и заинтересованными органами, организациями, лицами ($n = 21$) была включена вышеописанная группа трудностей.

Отранжированные кластеры трудностей процесса совершенствования психологической подготовки личного состава дежурных смен пункта управления связью были ожидаемо оценены как выражено субъективные, в силу качественного состава экспертной группы, и подлежащие дальнейшему анализу. С этой целью они были объединены с результатами системно-ситуативного анализа трудных ситуаций, связанных с проблематикой психологической подготовки дежурных смен пункта управления связью в деятельности командиров, начальников, должностных лиц ($n = 194$), с материалами включенного наблюдения ($n = 95$), и подвержены факторному анализу.

Используя метод факторного анализа (анализ главных компонент), набор коррелирующих исходных переменных был преобразован в другой набор некоррелирующих переменных. При этом получили три фактора с накопленной долей дисперсии (67,3), что было признано достаточным (табл. 1).

Таблица 1

Характеристика факторов трудностей совершенствования психологической подготовки личного состава дежурных смен пункта управления связью в деятельности должностных лиц органов управления соединений и воинских частей, а также уполномоченных должностных лиц (психологов)

№ п/п	Факторы	Собственное значение	Общая дисперсия, %	Накопленная дисперсия, %
1	Непрерывность работы	23,372	43,37	43,37
2	Конструктивность взаимодействия	8,623	15,823	52,74
3	Направленность работы на учет результатов и выработку рекомендаций	7,532	12,732	61,74

В дальнейшем при заданном числе факторов и при исключении значений факторных нагрузок менее 0,1 после проведения варимакс-вращения были получены итоговые факторные нагрузки трудностей в деятельности должностных лиц органов управления соединений и воинских частей, а также уполномоченных должностных лиц по совершенствованию психологической подготовки личного состава дежурных смен пункта управления связью, интерпретированные как группа внешних психологических условий совершенствования психологической подготовки личного состава дежурных смен пункта управления связью.

Фактор «непрерывность работы по совершенствованию психологической подготовки» (объединивший 10 переменных) получил наибольшее собственное значение, и, следовательно, он играет ведущую функциональную роль в деятельности командиров, начальников, должностных лиц (и психологов) по совершенствованию психологической подготовки личного состава дежурных смен пункта управления связью.

Вторым по количественным показателям и значимости оказался фактор «конструктивность взаимодействия» (8 переменных), третьим – «направленность работы на учет результатов и выработку рекомендаций» (8 переменных). Первый фактор имеет значительный вес и относится к частной факторной зоне, а остальные факторы – к общей зоне факторного профиля системы совершенствования психологической подготовки личного состава дежурных смен пункта управления связью.

Оценка группы внутренних психологических условий совершенствования психологической подготовки личного состава дежурных смен пункта управления связью проведена параллельно с использованием тех же приемов. Полученные данные свидетельствуют о достаточно равномерной представленности каждого фактора в структуре исследуемых трудностей личного состава дежурных смен пункта управления связью. Они непротиворечиво интерпретированы как группа внутренних психологических условий совершенствования психологической подготовки личного состава дежурных смен пункта управления связью.

На статистически значимом уровне доказано, что преобладающими факторами трудностей командиров, начальников, уполномоченных должностных лиц в вопросах совершенствования психологической подготовки являются:

- непостоянство этой деятельности;
- неконструктивное взаимодействие по проблеме совершенствования психологической подготовки с вышестоящими командирами, начальниками, с уполномоченными должностными лицами, а также с личным составом дежурных смен пункта управления связью, испытывающим трудности по проблемам совершенствования психологической подготовки;
- недостаточная направленность проводимой работы на учет полученных результатов и выработку рекомендаций.

Как преобладающие факторы трудностей личного состава дежурных смен пункта управления связью в вопросах совершенствования своей психологической подготовки на статистически значимом уровне были установлены:

- непонимание ими сущности психологической подготовки, недостаточное осознание ее значимости;
- недопонимание личной ответственности за свою психологическую подготовку и мотивации к ее совершенствованию;
- недостаточная согласованность усилий по совершенствованию своей психологической подготовки с деятельностью в этом направлении командиров, начальников и уполномоченных должностных лиц.

ВЫВОД

Доказанные факторы трудностей по совершенствованию психологической подготовки личного состава дежурных смен пункта управления связью непротиворечиво интерпретированы как группы внешних и внутренних психологических условий совершенствования психологической подготовки личного состава дежурных смен пункта управления связью.

Список используемых источников

1. Крук В. М. Программа и методика изучения психологических особенностей военнослужащих // Военная педагогика и психология: учеб. пособие для высш. военно-учеб. заведений / под ред. А. М. Герасимова [и др.]. – М.: ВА им. Ф. Э. Дзержинского, РАГС при Президенте Российской Федерации, 1996. – С. 39–52.
2. Носс И. Н. Профессиональная психодиагностика. Психологический отбор персонала: учеб. пособие. – М.: изд-во «Психотерапия», 2009. – 464 с.

3. Военная психология: методология, теория, практика: учеб. пособие / В. М. Крук [и др.]. – М.: ВУ, 1996. – 27 с.
4. Крук В. М. Экспериментальное исследование обеспечения личностной надежности специалиста // Вестник университета (Государственный университет управления). – 2021. – № 24. – С. 39–42.
5. Носс И. Н. Введение в практику психологического эксперимента. – М.: ПЕРСЭ, 2006. – 304 с.
6. Маклаков А. Г. Основы психологического обеспечения профессионального здоровья военнослужащих: автореф. дис. ... д-ра психол. наук. – СПб., 1996. – 37 с.
7. Мухаметжанов А. М. Психофизиологическая оценка адаптации военнослужащих в условиях прохождения воинской службы по призыву: автореф. дис. ... д-ра мед. наук. – М., 2015. – 47 с.

С. В. Костарев*,

кандидат педагогических наук, доцент;

Ю. С. Остроумова*,

кандидат педагогических наук, доцент;

С. Д. Ханин*,

доктор физико-математических наук, профессор

*ВАС имени Маршала Советского Союза С. М. Будённого, г. Санкт-Петербург.

МОДЕЛЬ ПОДГОТОВКИ ВОЕННЫХ СПЕЦИАЛИСТОВ К НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Предлагается и обосновывается модель дидактической системы подготовки военных специалистов к научно-технологической деятельности, включающая в себя: целеполагание, принципы формирования содержания и построения учебного процесса, стратегии обучения, его основные содержательные линии, формы и методы обучения, критериальную базу и процедуры оценки образовательных результатов. На примере подготовки военных инженеров-связистов раскрываются возможности реализации этой модели в качестве направляющей обновления образовательных программ, включая проектирование и реализацию новых дисциплин, раскрывающих научные основы и содержание современных профессионально значимых технологий.

Ключевые слова: дидактическая система, принципы реализации в военно-инженерном вузе, стратегии обучения, организационные формы подготовки, педагогические технологии.

Характерные для современных условий интенсивное развитие военных технологий, динамичное претворение в них новых научных принципов являются вызовом для военно-инженерных вузов, состоящим в необходимости обеспечить отвечающую требованиям времени подготовленность военных специалистов к научно-технологической деятельности. Государственное значение такой подготовки отражается в принятой Указом Президента РФ Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации, где воспроизводство кадров, способных обеспечить высокий темп освоения новых знаний и создание инновационной продукции, рассматриваются как фактор обеспечения независимости и конкурентоспособности страны [1].

В основе организации направленного на подготовку в военно-инженерном вузе к научно-технологической деятельности образовательного процесса должна лежать определенная дидактическая система, включающая в себя: целеполагание, принципы формирования содержания и построения учебного процесса, стратегии обучения, основные содержательные линии, формы и методы обучения, критериальную базу и процедуры оценки образовательных результатов. Разработка модели такой дидактической системы явилась целью настоящей работы.

Теоретико-методологическую основу проведенных с указанной целью исследований составили: деятельностная теория усвоения социального опыта, включая теории социального конструктивизма и метапознания, контекстного обучения, закономерности формирования психологических новообразований, общедидактические принципы, теории компетентностного и личностно-развивающего образования, концепции исследовательского и проектного (проектно-исследовательского) обучения, технологический подход к организации образовательного процесса.

В качестве методов исследования выступали методы информационно-аналитической деятельности в пространстве философской, психологической, педагогической и специальной литературы, анализ передового опыта в сфере профессионального инженерного образования, методы педагогического эксперимента.

Экспериментальной базой исследования явилась Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Будённого, где развитая в работе модель используется в качестве направляющей обновления образовательных программ подготовки военных инженеров-связистов, проектирования и преподавания новых дисциплин, раскрывающих научные основы и содержание современных профессионально значимых для инженеров-связистов технологий, создания направленных на развитие научно-технологического направления в образовании методических материалов, совершенствования педагогико-технологического обеспечения образовательного процесса.

Руководствуясь пониманием содержания научно-технологической (технической) деятельности, ее содержания, логики и методологии, востребованных для продуктивного осуществления личностных качеств специалиста, как основные цели подготовки к ней в военно-инженерном вузе определены следующие.

1. Обеспечение готовности к научно-технологической деятельности, отвечающей индивидуальным особенностям обучающегося, его способностям к получению и применению научных знаний для решения технологических задач в профессиональной сфере.

Общей, обязательной для достижения всеми обучающимися, является готовность к практическому освоению новых военных технологий, требующему владения знаниями лежащих в их основе и определяющих функциональные возможности научных принципов на предмет реализации имеющегося у технологии потенциала, оценки рисков, обеспечения надежности в применении.

Подготовка курсантов, проявляющих способности к полномасштабному решению технологических проблем, должна иметь в качестве своего ориентира достижение готовности к разработческой и экспертной деятельности, предполагающей осуществление практико-ориентированных исследований, творческое применение их результатов в технологических новациях, критический анализ достижений научного и технологического прогресса, определение его перспектив.

2. Раскрытие, развитие и реализация у обучающихся принципиально важных для военного специалиста интеллектуальных и профессионально-личностных качеств.

В решении проблемных задач научно-технологической деятельности должен реализовываться его потенциал в развитии столь значимых интеллектуальных качеств, таких как ясность, логичность, глубина, гибкость ума, самостоятельность, критичность, оригинальность мышления [2].

Особо обратим внимание на присущее научно-технологической деятельности единство анализа и синтеза, которое как отмечается в дифференциальной психологии, отличает работу ума хорошего полководца, способного к выделению в складывающейся ситуации наиболее существенного и объединению ее различных компонентов в единое целое при принятии решения [3].

В части востребованных и, соответственно, развиваемых в подготовке к научно-технологической деятельности профессионально-личностных качеств как наиболее значимые отметим следующие: стремление и способности к выявлению и постановке новых проблемных задач, поиску и реализации адекватных методов и средств их решения, прогностичность, самостоятельность и динамичность в достижении результатов, способности к саморегуляции и организации коллективной деятельности, умение принимать решения в проблемных ситуациях, творческие способности. В отношении последних существенны открываемые возможности преодоления выделяемых в психологии мышления как основные препятствий для творчества: конформизма и цензуры, стереотипности, импульсивности, эгоцентризма мысли [4].

3. Создание оснований для прогрессивных изменений в системе военно-инженерного образования.

Осуществление в военно-инженерном вузе подготовки обучающихся к научно-технологической деятельности на отвечающем вызовам времени уровне с необходимостью предполагает существенные изменения во всех звеньях педагогической системы:

- целях и проектируемых результатах образования, в которых должно быть существенно актуализировано формирование у будущего военного специалиста готовности к наукоемкой профессиональной деятельности, творческой самостоятельности в ней;
- содержании обучения, которое должно представлять как предмет деятельности, основанной на приобретенных знаниях и применении освоенных методов и средств;
- построении образовательного процесса как следующего логике и методологии профессиональной научно-технологической деятельности;
- деятельности преподавателя и обучающегося, которые должны выступать как партнеры в процессе обучения;
- педагогико-технологическом обеспечении образовательного процесса – интеграции в него современных, отвечающих предмету целям и предмету изучения педагогических технологий, формировании у обучающегося познавательной и профессиональной самостоятельности.

Подготовка к научно-технологической деятельности должна стимулировать изменения в информационно-образовательном пространстве военно-инженерного вуза, интеграцию в него высокотехнологичного оборудования, интеллектуальных информационных систем образовательного назначения.

В качестве ведущих принципов подготовки обучающихся к научно-технологической деятельности в предлагаемой модели определены и обоснованы следующие.

1. *Принцип интегративного подхода в теории и практике обучения.*

Необходимость интегративного подхода обусловлена, прежде всего, широтой целеполагания подготовки к научно-технологической деятельности, системностью содержания и методологии.

В части теории обучения реализация этого принципа состоит в интеграции в концептуальных основах подготовки подходов, отвечающих различным образовательным парадигмам: социокультуросообразного, природосообразного, компетентностного, личностно-развивающего, контекстного обучения в их системном синтезе.

В практике обучения – это системное единение фундаментальной и прикладной составляющих в содержании образования, методов и технологий репродуктивного и творческого обучения, учебной, исследовательской и проектной деятельности обучающегося, осуществляемых для достижения этих целей новаций в образовательном пространстве военно-инженерного вуза. В оценке результатов обучения – это ориентация на достижение отвечающих требованиям времени качества и эффективности образовательного процесса в их современном интегративном понимании [5, 6].

2. *Принцип активизации личностных ресурсов обучающегося.*

Актуальность осуществления этого принципа в практике обучения определяется тем, что в современных условиях интенсивного научно-технологического развития традиционное обучение, состоящее в передаче обучающимся знаний, обнаруживает свою недостаточность. На смену традиционной парадигме обучения приходит парадигма учения, ключевую роль в которой играют: потребность обучающегося в приобретении знаний, его интеллектуальные способности, личностно-смысловая включенность в образовательный процесс, умение актуализировать имеющиеся знания в интересах постановки и решения профессиональных задач, субъектные свойства, творческий потенциал.

Для реализации данного принципа в практике обучения должны быть мобилизованы мотивационные ресурсы содержания и достижений научно-технологической деятельности, направленные на раскрытие и развитие востребованных в ней личностных качеств методики и технологии обучения, психолого-педагогическое сопровождение учебной и учебно-профессиональной деятельности обучающихся.

3. Принцип индивидуализации обучения.

Будучи с очевидностью штучным производством, формирование военного специалиста, готового к конструктивной научно-технологической деятельности и адекватной экспертизе новых технологий, обладающего индивидуальным стилем мышления и действий, с необходимостью предполагает диверсификацию образовательных программ в военно-инженерном вузе, осуществляемую с учетом уровня, индивидуальных и психологических способностей каждого обучающегося.

В образовательном процессе с необходимостью должны осуществляться дифференциация целей, характера и темпа освоения учебного материала, реализовываться право выбора обучающимся индивидуального образовательного маршрута, создаваться условия для специализации в определенном проблемном поле. Важную роль в этом играет получение исследовательской и технологической практик, освоение в них основных форм, методов и средств научно-технологической деятельности в их конкретных проявлениях, творческая самореализация обучающегося в решении профессионально значимых проблемных задач.

Принципиально важными ресурсами в плане обеспечения индивидуализации обучения обладает использование в образовательном процессе современных информационных технологий, реализуемое на их основе интерактивное обучение. Необходимым условием результативности применения этих технологий является психолого-педагогическое обеспечение трансформации получаемой обучающимся информации в действенные для решения проблем научно-технологической деятельности знания – задача, которая в настоящее время, по видимому, находится еще на постановочной стадии.

4. Принцип актуализации самостоятельной деятельности обучающихся.

Значение этого принципа как регулятива в подготовке будущего военного инженера к научно-технологической деятельности определяется ключевой ролью самостоятельности в обретении личностного смысла в обучении, мотивации к освоению его содержания, практическом освоении логико-операциональной структуры и инструментария процесса решения проблемных задач, формировании умений и опыта продуктивного применения полученных знаний и имеющихся способностей к достижению новых целей, становлению у обучающегося субъектных свойств.

В содержательном плане речь идет о необходимости создания в осуществляемом военно-инженерном вузе образовательном процессе условий для самостоятельного прохождения будущим военным специалистом всего процесса решения представительных в содержательном и методологическом аспектах проблемных задач, в ходе которого оказываются востребованными и, соответственно, развиваемыми способности к самообразованию, системному видению подлежащей решению проблемы, освоению накопленного в научно-технологической деятельности опыта, способов и методов их осуществления, воплощению приобретенных знаний в профессионально значимые достижения, конструктивной реализации и повышения личностного творческого потенциала.

В достижении этой цели должны быть задействованы педагогические технологии деятельностного типа, методы организации творческой работы, возможности, открываемые дидактически и методологически оправданным применением компьютерных средств, вовлечение обучающихся в инновационную наукоёмкую деятельность.

5. Принцип профессиональной контекстуализации образовательных процессов.

Профессиональная научно-технологическая деятельность должна в освоении своего содержания выступать как стимул к поисково-познавательной деятельности, предмет изучения обучающимся, сфера приобретения им индивидуального опыта, развития принципиально важных интеллектуальных и профессионально-личностных качеств, творческих способностей.

Необходимым условием осуществления данного принципа является организация образовательного процесса как модели реальной научно-технологической деятельности [7], целостно отражающей ее содержание, формы и условия, динамику осуществления, действия и

отношения участвующих в ней специалистов. Образовательная деятельность такого контекстного типа становится по существу квазипрофессиональной, максимально приближенной во всех своих компонентах к деятельности специалиста. Это позволяет реализовать присущую контекстному обучению возможность освоения обучающимся как предметного, так и социального ее содержания, что существенно облегчает адаптацию выпускника вуза к реалиям профессиональной деятельности [8, 9].

Эффективными формами образовательной деятельности в реализации данного принципа являются проблемные лекции, научно-практические семинары, дискуссии, выполнение обучающимся учебно-исследовательских и проектных заданий, их погружение в реальную научно-технологическую деятельность.

В этой связи остро встает вопрос о достаточности методологической культуры преподавателей вуза, их личностных интеллектуальных ресурсах, имеющемся опыте наукоемкой профессиональной деятельности, креативности [10].

6. Принцип целостности и системности.

В проектировании и реализации образовательного процесса в военно-инженерном вузе, преследующего цели подготовки к научно-технологической деятельности, необходимо обеспечение целостности и системности в отражении ее содержания и методологии, всех основных типов профессионально значимых задач, ключевых компонентов их решения, востребованных в нем видов деятельности, используемых методов [7].

Руководствуясь психологическими закономерностями освоения профессиональной деятельности [11], целостность и системность должны обеспечиваться и в построении образовательного процесса как последовательном формировании мотивов, целей, программы, информационной основы, подходов к принятию решения, профессиональных качеств и их синтеза в единую целостную психологическую структуру.

Каждый из указанных блоков этой структуры представляет собой подсистему, состоящую из взаимосвязанных компонентов. Так, системообразующий компонент – необходимые для продуктивной научно-технологической деятельности профессиональные качества – включает с необходимостью в себя когнитивные, творческие, оргдеятельностные способности.

Практической реализации данного принципа отвечает углубленное обучение определенной актуальной тематики в рамках выделяемых в традиционных учебных курсах циклов занятий и спецкурсов, отражающих содержание проблематики перспективных направлений научно-технологического развития.

7. Принцип систематичности.

Требуемая систематичность в подготовке к научно-технологической деятельности состоит в отвечающем психолого-педагогическим закономерностям последовательном освоении необходимых знаний, способов и методов осуществления при соблюдении определенной динамики в расширении и усложнении образовательного поля.

В содержательном плане – это продвижение от введения в тематику научно-технологической деятельности и обзора ее достижений на этапах изучения фундаментальных и общепрофессиональных дисциплин до освоения отвечающего специализации будущих военных специалистов предметного материала в профильных дисциплинах, постепенное приближение учебных задач в их основных характеристиках к профессиональным.

В процессуальном плане – это последовательное расширение спектра осваиваемых способов деятельности и ее компонентов, постепенное повышение уровня востребованной в учебном процессе познавательной самостоятельности обучающегося, ее трансформация в профессиональную самостоятельность, проявляемую в полномасштабном решении актуальных проблем научно-технологической деятельности с использованием всей совокупности необходимых подходов, методов и средств в присущих ему развертке и ролевом распределении обязанностей между участниками.

Достижение такой систематичности требует соблюдения преемственности в проектировании и организации процесса освоения образовательных программ, синхронизации повыше-

ния требований к обучающимся с ростом их познавательных возможностей и приобретенного опыта.

8. *Принцип непрерывности в изучении проблематики.*

Будучи осуществляемой в подготовке к научно-технологической деятельности, непрерывность изучения определенной, отвечающей специализации обучающихся проблематики, на всем протяжении образовательного процесса создает необходимый для системного и систематического освоения ее содержания временной ресурс, возможности приобретения в процессе обучения в вузе реализованного опыта самореализации в новой для себя области.

В обеспечении такой непрерывности в практике обучения должно предусматриваться расширение содержания изучаемой проблематики на все типы учебных дисциплин и виды деятельности в соответствии с их назначением и образовательными ресурсами, координация учебных программ преподаваемых дисциплин с соблюдением логической целостности содержания обучения.

В организации образовательного процесса целесообразным является циклический подход к развертыванию содержания предметного материала. В первом цикле, осуществляемом при изучении фундаментальных дисциплин, обучающимися осваиваются базовые понятия и представления, принятые научные концепты решения ключевых технологических задач. Во втором цикле, при изучении общепрофессиональных дисциплин – основы научной инженерии проектирования функциональных объектов и процессов с необходимыми характеристиками. Наконец, в третьем цикле, в рамках изучения специальных дисциплин – практическое использование достижений научного и технологического прогресса в профессиональной деятельности.

9. *Принцип приоритета проблемно-детерминированной деятельности.*

Основанием для выдвижения данного принципа является, прежде всего, утверждаемая психологией и педагогикой определяющая роль деятельности в достижении сущностного понимания содержания обучения, раскрытии и развитии личностных способностей, освоении социального контекста будущей профессиональной деятельности.

Проблемность выступает как средство развития мышления, его активизации в интересах решения стоящей задачи, повышения мотивации к его изучению, трансформации учебной информации в полноценные знания, стимул к целостному освоению профессиональной деятельности в ее содержательном и методологическом аспектах, условие приобретения опыта творческой деятельности.

Придание приоритета проблемно-детерминированной деятельности отвечает реализации в системе военного инженерного образования компетентностного подхода, согласно которому необходимость в разрешении проблемы – условие, а направленная на него деятельность – норма проявления компетентности [12].

Столь же отчетливо прослеживается и соответствие направленности проблемно-детерминированного обучения на развитие личности, для которой, как отмечалось В. В. Сериковым, «не может быть освоенным не созданное в собственной практике, значимым – не пережитое в собственном опыте, полезным – не утверждающее ее достоинство» [13].

Необходимыми условиями реализации образовательного потенциала проблемно-детерминированной деятельности являются: построение содержания обучения как системы представительных в содержательном и методологическом аспектах проблемных задач, наличие соответствующего учебно-методического и педагогико-технологического обеспечения образовательного процесса, готовность к осуществлению проблемного обучения преподавателей вуза.

10. *Принцип сотрудничества субъектов образовательного процесса.*

Моделируя в образовательном процессе научно-технологическую деятельность, следует придерживаться присущей ей установке на решение проблемных задач, определение и реализация направлений которого возможны при наличии должного уровня подготовленности исполнителей. Это актуализирует субъект-субъектные отношения в образователь-

ном процессе, диалогичность во взаимодействии преподавателя и курсанта, обучающихся между собой.

Задача здесь состоит в обеспечении в образовательном пространстве военно-инженерного вуза партнерских отношений между субъектами, творческого сотрудничества преподавателя и обучающегося в совместно осуществляемой ими деятельности, что в свою очередь, как уже отмечалось, предполагает наличие у обучающегося активности и ответственности.

При этом актуализируются способности преподавателя вуза к стимулированию обучающихся к познавательной деятельности, интенсификации их мышления, выработке в нем аналитичности и продуктивности, индивидуализации процесса подготовки с учетом личностных особенностей обучающегося, управлению коллективной деятельностью, созданию психолого-педагогических условий для раскрытия и развития творческого потенциала обучающегося, методическому сопровождению процесса его самостоятельного прохождения решения проблемных задач.

Преследуя эти цели, в образовательном процессе должны реализовываться возможности, открываемые использованием активных методов обучения, интерактивного информационного ресурса, организации исследовательской, проектной (проектно-исследовательской), экспертной деятельности обучающихся.

11. Принцип опережающего обучения.

Подготовка в военно-инженерном вузе к научно-технологической деятельности должна быть направлена в будущее, создавать основания для профессионального развития обучающихся в ближайшей и отдаленной перспективах.

Это означает, что создаваемая в результате обучения теоретическая база должна быть достаточной для того, чтобы служить ориентировочной основой и средством решения задач в будущей профессиональной деятельности. В этой связи первостепенное внимание должно уделяться формированию у обучающихся представлений, в отношении которых есть обоснованная уверенность, что они останутся основополагающими и в дальнейшем развитии науки и технологии. Речь здесь идет, в первую очередь, о фундаментальных знаниях и базирующихся на них концепциях создания профессионально значимых функциональных объектов и процессов.

Еще один важный аспект – формирование у обучающихся методологической культуры, овладение ими методами и средствами научно-технологической деятельности, научным стилем мышления и понимания в отвечающих последнему объяснительной, описательной и прогностической составляющих, восприятие обучающимся присущей действительной методологии профессиональной деятельности нелинейности.

Значительная нагрузка в реализации данного принципа ложится на фундаментальные дисциплины, включая выполняемые в рамках их изучения практикумы как призванные к формированию у обучающегося умений освоения и использования базовых знаний и методов научных исследований. Принципиально важным здесь является наличие учебно-методического обеспечения проблемности и конкретности предметного материала, востребованность самостоятельности обучающегося в познавательной деятельности.

В определении стратегий обучения направляющими являлись целевые установки подготовки в военно-инженерном вузе к научно-технологической деятельности. В качестве основных определены стратегии обучения, призванные к достижению готовности обучающегося к следующему:

- пониманию научных принципов, заложенных в основу военных технологий и определяющих допустимые условия их практического применения, следованию этим принципам в профессиональной деятельности;
- получению и применению научных знаний на предмет совершенствования существующих и разработки новых технологий;
- соотнесению технологий профессиональной деятельности с запросами времени и обоснованному планированию и организации научно-технологической деятельности.

В контексте широко используемого в педагогике ранжирования уровней образовательных целей по Б. Блуму [14] указанные стратегии обучения отвечают соответственно знаниям на уровне:

- понимания и применения (сформированности способностей к объяснению важной информации и решению закрытых проблем);
- анализа и синтеза (сформированности способностей к решению открытых проблем, нахождению оригинальных решений);
- оценки (сформированности способности к вынесению основанных на научных знаниях критических суждений).

В контексте профессиограммы военного специалиста – его готовности к инженерно-эксплуатационной, практикоориентированной (проектной) научно-исследовательской, экспертной и менеджерской видам деятельности.

В соответствии с принятыми стратегиями обучения в качестве основных содержательных линий направленного на подготовку научно-технологической деятельности обучения в военно-инженерном вузе выделены следующие:

- фундаментальные основы современных профессионально значимых технологий;
- содержание и применение наукоемких технологий профессиональной деятельности;
- содержание и подходы к решению основных типов задач профессиональной научно-технологической деятельности;
- тренды в методологии научно-технологической деятельности;
- методы и средства научной инженерии;
- передовые достижения и проблемные зоны научно-технологической деятельности;
- тенденции и перспективы научно-технологического развития в профессионально значимых областях деятельности.

В качестве базовых организационных форм подготовки в обсуждаемой модели ее дидактической системы предлагаются:

- построение обучения как модели профессиональной научно-технологической деятельности;
- обучение через реальную, направленную на решение актуальных задач научно-технологическую деятельность.

В ряду методов обучения, позволяющих реализовать указанные его организационные формы, как наиболее существенные выделим методы, отвечающие следующим педагогическим технологиям:

- активного восприятия информации;
- исследовательского обучения;
- проектного (проектно-исследовательского) обучения.

Применение первой технологии направлено на формирование у обучающегося умений и опыта продуктивного освоения предоставляемой информации [15]. Так, для научения работы с текстом может быть использована технология «INSERT» (*I – interactive, N – noting, S – system, E – effective, R – reading, T – thinking*), предполагающая осуществление приемов, повышающих эффективность чтения, облегчающих анализ прочитанного, способствующих формированию критических суждений, в том числе: системные разметки текста, построение смысловых кластеров, денотантных графов, концептуальных таблиц.

Исследовательский метод, состоящий в построении образовательного процесса в логике целостной поисково-познавательной деятельности, интеграции в него ее форм и методов – научного эксперимента (натурного и компьютерного), моделирования (физического и математического) [16, 17], направлен на формирование у обучающегося познавательной самостоятельности, методологической культуры, овладения необходимыми для производства научных знаний умениями и опытом.

К наиболее значимым в плане подготовки к научно-технологической деятельности являются умения постановки подлежащих исследованию проблемы (проблемной задачи), опре-

деления конструктивных подходов к ее решению, выбора, а при необходимости, разработки его методов, их практической реализации, адекватной интерпретации получаемых результатов, прогнозирования новых, представляющих научный и практический интерес верифицируемых явлений.

Несомненна роль исследовательского метода и в общем плане достижения требуемых результатов освоения содержания образования как отвечающего формированию всех его основных компонентов – опыта познавательной деятельности, осуществления способов ее реализации, эмоционально-ценностного отношения к окружающему миру, творческого поиска [18].

Метод проектного (проектно-исследовательского) обучения как непосредственно моделирующего в образовательном процессе научно-технологическую деятельность [19] должен быть основным в подготовке обучающихся, ориентируемых на будущую профессиональную проектно-инженерную деятельность.

В реализации данного метода в практике обучения в военно-инженерном вузе с необходимостью должны быть востребованы и, соответственно, развиваться индивидуальный стиль мышления и действий в получении посредством исследований знаний и выработке на их основе решений технологической проблемы. Принципиальное значение для военного специалиста имеют открываемые здесь возможности формирования у него так называемого практического интеллекта, проявляемого в способностях целостного и системного видения проблемы, вычленения в ней собственных подлежащих решению задач, актуализации имеющихся знаний на предмет принятия решения в конкретных условиях.

Важными достоинствами проектно-исследовательского обучения являются его практико-ориентированность и полномасштабность, завершенность получением профессионально значимого практического результата, что способствует самоактуализации обучающегося в осуществляемой деятельности.

В постановке проектного задания, его выполнении, соотнесении полученных результатов с запросами практики с необходимостью оказывается задействованным критическое мышление, способность к рефлексивному анализу, что в совокупности с приобретаемым опытом решения проблемных профессиональных задач является основанием для личностного развития.

В ряду используемых в контроле образовательных результатов показателей, наряду с освоенностью содержания обучения, должны выступать сформированность у обучающегося умений и опыта действий в пространстве проблем научно-технологической деятельности, его деятельностная активность в решении проблемных задач, личностная готовность к существенному освоению содержания и участию в разработке перспективных направлений научно-технологического развития.

Оценка указанных показателей должна осуществляться на основе экспертного элементного анализа выполнения обучающимся учебных и учебно-профессиональных проблемных заданий [7]. Так, в части сформированности умений и деятельностной активности обучающегося оценке должны подлежать: способности и деятельностная позиция в выявлении и постановке проблемы, выборе и реализации направлений, методов и средств ее решения, проектировании и осуществлении программы познавательной деятельности, применении полученных знаний для выработки технического решения, его практическом воплощении, критическом соотнесении полученных результатов с запросами науки и технологии, перспективном планировании. Существенными показателями, подлежащими экспертной оценке, являются: уровень самостоятельности обучающегося в деятельности, включающей его самооценку, стремление и способности к решению нестандартных задач, проявление в нем творческих способностей.

Значимую информацию в оценке образовательных результатов должно давать портфолио обучающегося – зафиксированные в нем личностные достижения (исследовательские работы, выполненные проекты, пройденные практики, олимпиады, конкурсы, конференции, научные публикации, изобретения и др.) и их оценка, включая самооценку как средство регуляции в осуществляемой деятельности и планирования ее в будущем.

Список используемых источников

1. Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации [утв. Указом Президента РФ № 642 от 01 дек. 2016 г.]. – URL: <http://kremlin.ru/acts/bank/41449> (дата обращения: 18.05.2022).
2. Кудрявцев Т. В. Психология технического мышления. – М.: Педагогика, 1975. – 303 с.
3. Теплов Б. М. Ум полководца. – М.: Педагогика, 1990. – 208 с.
4. Линдсей Г., Халл К., Томпсон П. Творческое критическое мышление // Хрестоматия по общей психологии. Психология мышления / под ред. Ю. Б. Гиппенрейтера и В. В. Петухова. – М.: МГУ, 1981. – С. 149 – 152.
5. Бордовский Г. А., Нестеров А. А., Трапицын С. Ю. Управление качеством образовательного процесса: моногр. – СПб.: Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2001. – 335 с.
6. Зуев П. В. Теоретические основы повышения эффективности деятельности учащихся при обучении физике: дис. ... докт. пед. наук. – СПб., 2000. – 343 с.
7. Остроумова Ю. С. Совершенствование подготовки военно-инженерных кадров к решению наукоемких профессиональных задач: моногр. – СПб.: ВАС, 2019. – 240 с.
8. Вербицкий А. А., Ларионова О. Г. Личностный и компетентностный подходы в образовании: проблемы интеграции. – М.: Логос, 2009. – 336 с.
9. Психология и педагогика контекстного обучения / под научн. ред. А. А. Вербицкого. – М.; СПб.: Нестор-История, 2018. – 416 с.
10. Безлепкин Н. И. О методологической культуре преподавателя // Развитие военной педагогики в XXI веке: материалы VII межвузовской научно-практической конференции / под ред. С. В. Костарева [и др.]. – СПб.: ВАС, 2020. – С. 211–216.
11. Шадриков В. Д. Проблемы системогенеза профессиональной деятельности. – М., 1982. – 185 с.
12. Компетентностный подход в педагогическом образовании: моногр. / под ред. В. А. Козырева, Н. Ф. Радионовой, А. П. Тряпицыной. – СПб.: Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2008. – 392 с.
13. Сериков В. В. Общая педагогика. – Волгоград, 2004. – 278 с.
14. Blum V. Handbook on formative and summative evaluation of student learning. – Hastings, Madaus, 1971. – 923 p.
15. Практикум по технологиям обучения современного студента / А. Г. Грецов [и др.]. – СПб.: Ин-т профтехобразования РАО, 2007. – 163 с.
16. Ханин С. Д., Хинич И. И. Исследовательское обучение физическим основам электроники в подготовке педагогических кадров: моногр. – СПб.: Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2009. – 127 с.
17. Ханин С. Д., Хинич И. И. Освоение физики материалов и приборов электронной техники и проблема достижения целостности и результативности исследовательского обучения: моногр. – СПб.: Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2009. – 108 с.
18. Педагогический энциклопедический словарь / гл. ред. Б. М. Бим-Бад. – М.: Российская энциклопедия, 2002. – 528 с.
19. Костарев С. В., Остроумова Ю. С., Ханин С. Д. Педагогико-технологическое обеспечение профессиональной подготовки военных специалистов в контексте реализации Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации // Развитие военной педагогики в XXI веке: материалы IV межвузовской научно-практической конференции / под ред. С. В. Костарева, И. И. Соколовой, Н. В. Ершова. – СПб.: ВАС, 2017. – С. 128–136.

С. В. Костарев*,

кандидат педагогических наук, доцент;

Ю. С. Остроумова*,

кандидат педагогических наук, доцент;

С. Д. Ханин*,

доктор физико-математических наук, профессор

*ВАС имени Маршала Советского Союза С. М. Будённого, г. Санкт-Петербург.

ТОЧКИ РОСТА В ПОДГОТОВКЕ ВОЕННО-ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Раскрываются имеющиеся резервы для развития научно-технологического направления в военно-инженерном образовании. Определяются и обосновываются возможности, открываемые в рассматриваемом аспекте дидактически и методологически оправданным обновлением содержания, организации и ресурсообеспечения образовательного процесса в военно-инженерном вузе. Формулируются необходимые психолого-педагогические условия реализации этих возможностей.

Ключевые слова: научно-технологическое образование, резервы совершенствования, условия результативности.

В современных условиях технологизации боевых действий, ведения информационного противоборства, востребованности вооружения качественно нового уровня особое значение приобретает готовность военно-инженерных кадров к научно-технологической деятельности. В этой связи перед военно-инженерными вузами встает задача развития научно-технологического направления в образовании, что связано:

- с потребностью в специалистах, способных обеспечить отвечающий вызовам времени прогресс в технологическом оснащении Вооруженных сил;
- с необходимостью определения направления и содержания деятельности по системному обновлению в военно-инженерном вузе образовательного процесса в целях придания ему нового качества и повышения его эффективности;
- с необходимостью повышения уровня готовности обучающихся к научно-технологической деятельности в профессиональной сфере, т. е. получению и продуктивному применению научных знаний для решения задач разработки и эффективного использования новых военных технологий и техники.

Решение рассматриваемой задачи находится в русле реализации в военно-инженерном образовании компетентностного и личностно-развивающего подходов в их интегративном единстве. Это предопределяется востребованностью и, следовательно, развитием в научно-технологическом образовании у обучающихся умений и опыта решения профессионально значимых проблем, что рассматривается как условие и норма проявления компетентности [1], способностей к обновлению компетентностей (А. Г. Асмолов), формирования принципиально важных для военного специалиста личностных качеств, включая аналитичность и конструктивность мышления, познавательную и профессиональную самостоятельность, чувство нового, субъектность, конкретность в постановке и достижении цели, способностей принимать решение в нестандартных ситуациях и нести за него ответственность.

Отметим и соответствие освоения содержания научно-технологического образования реализации принципа природосообразности – в силу удовлетворения генетически заданных человеку потребностей: знать, понимать и уметь, и принципа социокультуросообразности – в силу того, что как отмечал И. Кант, «все успехи в культуре, которые служат школой для человека, имеют своей целью применять к жизни приобретенные знания и навыки».

Настоящая работа посвящена определению резервов в развитии научно-технологического направления в военно-инженерном образовании. Оно осуществлялось исходя из содержания и методологии научно-технологической деятельности в ее расширительном, включающем наукоемкое решение задач применения военных технологий и высокотехнологичного вооружения, понимании, психолого-педагогических закономерностей профессионального развития, особенностей условий обучения в военном вузе, опыта применения в нём передовых образовательных практик.

В результате проведенного анализа как наиболее значимые точки роста в совершенствовании подготовки в военно-инженерном вузе к научно-технологической деятельности определены следующие.

1. Активизация образовательных ресурсов фундаментальных дисциплин.

В силу широты востребуемых в научно-технологической деятельности знаний, подготовка к ней в вузе должна осуществляться непрерывно, на всем протяжении образовательного процесса, при задействовании образовательных ресурсов многих изучаемых в нем дисциплин. Принципиально важные и вместе с тем далеко не в полной мере используемые возможности предоставляет реализация информационных, методологических и развивающих ресурсов фундаментальных дисциплин.

Реализация информационных ресурсов содержания фундаментальных дисциплин состоит в освоении на этапе их изучения знаний, являющихся ориентировочной основой для развития ключевых технологий. Так, освоение научных принципов, лежащих в основе технологий нанoeлектроники, может начинаться уже в курсе физики на основе приобретаемых в нем модельных представлений о пространственном квантовании энергии в системах пониженной размерности, туннельном эффекте и пр.; технологий оптической связи – о распространении электромагнитных волн в неоднородных средах, взаимодействии электромагнитного излучения с веществом, электронных процессах в полупроводниковых гомо- и гетероструктурах.

Актуальность реализации методологических ресурсов содержания фундаментальных дисциплин определяется генетически присущей их содержанию основательностью в плане предметного освоения логико-операциональной структуры и базовых компонентов научных познаний, используемых методов экспериментального решения задач, физического и математического моделирования, изучения модели средствами вычислительного (компьютерного) эксперимента.

Особое значение имеет востребованность и, соответственно, возможности развития физического понимания [2] – способностей к объяснению, описанию установленных явлений и, что особенно важно в научно-технологической деятельности, прогнозированию новых явлений, которые могут найти значимое практическое применение. Вкупе с приобретенными фундаментальными знаниями развитое физическое понимание делает специалиста профессионально мобильным, адаптируемым к современным динамично изменяющимся условиям.

В части развивающих ресурсов содержания фундаментальных дисциплин принципиальное значение имеют возможности выработки столь важных для продуктивной научно-технологической деятельности интеллектуальных личностных качеств, как аналитичность, системность, критичность, дивергентность мышления, ясность и глубина ума [3].

2. Обеспечение целостности и системности в отражении научно-технологичной деятельности.

Будучи неотъемлемыми атрибутами научно-технологической деятельности, целостность и системность с необходимостью должны быть присущи содержанию направленного на подготовку к ней обучения. Как показывает анализ содержания обучения в военно-инженерных вузах, в рассматриваемом аспекте здесь существует ряд проблемных зон, устранение которых представляет существенный резерв совершенствования подготовки военных специалистов к научно-технологической деятельности.

Во-первых, излишняя разобщенность в содержании обучения фундаментальным и специальным дисциплинам. Содержание изучаемых в вузе фундаментальных дисциплин остается

неоправданно далеким от профессионально значимых приложений, а профильных дисциплин – от определяющих научно-технологическую деятельность в ее перспективных направлениях фундаментальных основ.

Точка роста здесь состоит в преодолении этой сепаратности и прежде всего в раскрытии содержания обучения инженерного потенциала фундаментальных знаний в его конкретных, профессионально значимых проявлениях. Фундаментальные знания должны представлять в учебных дисциплинах в присущей им в научно-технологической деятельности роли концептуальной основы, методического арсенала развития технологий, основания для определения его перспектив и оценки рисков.

Существенным является и предметное отражение роли технологических достижений в развитии науки: расширении ее проблематики и инструментария, открытии принципиально важных фундаментальных эффектов, становлении новых перспективных научных направлений.

Во-вторых, недостаточность отражения в содержании обучения процессуальной стороны научно-технологической деятельности. На смену привычному представлению содержания обучения в статике как информации фактологического характера должна прийти его динамическая развертка в учебном процессе, отвечающая в построении подлежащей освоению методологии научно-технологической деятельности.

В-третьих, фрагментарность в представлении содержания проблематики научно-технологического развития. В интересах совершенствования подготовки военных специалистов к научно-технологической деятельности содержанию обучения в вузе следует придать широту в плане охвата ее основных компонентов в изучаемой области, основательность в формировании системного видения требующих своего решения для достижения проектируемого результата задач научных исследований и инженерных разработок.

Нельзя не сказать и о сохраняющейся отдаленности гуманитарного образования от естественнонаучного и технического. На необходимость их интеграции указывали многие, в том числе величайший физик А. Эйнштейн, который отмечал: «Недостаточно учить человека лишь специальности. Поскольку в этом случае он делается лишь полезной машиной, но не полноценной личностью... Он должен глубоко осознавать, что красиво и что морально. Иначе своими специализированными профессиональными знаниями он больше похож на выдрессированную собаку, чем на гармонично развитую личность».

Интересам подготовки обучающихся к научно-технологической деятельности способствовало бы, с одной стороны, повышение удельного веса в содержании гуманитарных дисциплин истории и философии науки и техники, отражения роли в их развитии отечественных ученых и инженеров и, с другой стороны, гуманитаризация содержания фундаментальных и профильных дисциплин.

3. Построение содержания обучения в логике научно-технологической деятельности.

Принципиальное значение в плане совершенствования подготовки в военно-инженерном вузе к научно-технологической деятельности имеет следующее:

- придание содержанию обучения и его освоению в образовательном процессе проблемного характера;
- представленность содержания обучения в задачно-деятельностной форме;
- обращенность к решению реальных задач, представленных в отвечающей научно-технологической деятельности форме.

Проблемность стимулирует мышление обучающихся, которое, следуя психологии, порождается именно проблемной ситуацией (проблемной задачей) [4, 5]; деятельностный характер обучения необходим в плане формирования умений приобретения и применения знаний в целях достижения значимого для практики результата. Процесс освоения содержания обучения, представленного в нем как предмет деятельности [6], становится средством овладения обучающимся опытом ее продуктивного осуществления.

Представление содержания обучения в задачно-деятельностной форме придает процессу учебной деятельности логику исследования, разворачивающегося от постановки вопроса к формированию необходимых для освоения теоретических представлений.

Особо остановимся на третьем из указанных моментов. Продвижение здесь состоит в том, что наряду с традиционными учебными задачами, которые решаются с помощью известных, подлежащих отработке методов, обучающийся сталкивается с характерными для профессиональной деятельности задачами, методы решения которых заранее не известны и требуют своего изыскания. При этом с необходимостью оказывается востребованной самостоятельность обучающегося, причем не только познавательная, но и профессиональная. Кроме того, в силу присущих задачам профессиональной деятельности нестандартности и множественности подходов к решению, последнее становится предметным уроком творческой деятельности, способствует формированию у обучающегося индивидуального стиля мышления и действий.

Нельзя не отметить и важное значение происходящей в процессе решения таких задач интериоризации профессиональной деятельности во внутренний мир человека, его сознание, что придает осваиваемой в обучении информации действительный смысл знания [7], а обладающей ими личности – качества профессионала, необходимые ему когнитивные, творческие и оргдеятельностные способности.

4. Организация процесса обучения как проектно-исследовательской деятельности.

Эффективность проектно-исследовательского обучения в военно-инженерном вузе как средства совершенствования подготовки к научно-технологической деятельности определяется целым рядом моментов, в том числе:

- соответствием организации процесса обучения самой осваиваемой деятельности в целевой ангажированности значимой для практики проблемой (проектным заданием) и исследовательском подходе к ее решению;
- созданием условий для деятельностного освоения и комплексного применения интегрированных в образовательный процесс методов и средств научных исследований в контексте решения проблемных задач научно-технологической деятельности;
- формированием у обучающихся проектной компетентности как одной из важнейших для военного инженера в современных условиях;
- развитием универсальных умений выявления и постановки проблемной задачи, конструктивного применения в ее решении научных знаний и методов, практической реализации принятого решения;
- развитием и реализацией профессионально значимых для военного специалиста качеств: целеустремленности, концентрированности, системности, субъектности, продуктивности, ответственности, коммуникативности.

В проектно-исследовательском обучении с необходимостью формируется опыт осуществления самообразовательной и информационно-аналитической деятельности. В силу придаваемой этим видам деятельности проблемной детерминированности при их осуществлении у обучающегося развиваются способности к адекватной оценке своих знаний на предмет их достаточности для достижения результата, определению задач и поля самообразовательной деятельности, целенаправленному поиску и анализу информации, конструированию нового знания в проблемной среде.

Наконец, в силу присущей проектно-исследовательской деятельности единства в ней учебной, научной, и практической составляющих, организация в ее логике образовательного процесса в военно-инженерном вузе открывает возможности достижения комплексности и системности в формировании у обучающегося необходимых для научно-технологической деятельности способностей, развития профессионально личностных качеств, составляющих основу для формирования компетентностей и будущего их совершенствования в профессиональной деятельности.

5. Совершенствование учебно-методического обеспечения образовательного процесса.

Актуальным в рассматриваемом аспекте является следующее. Во-первых, предметное отражение в содержании используемых в образовательном процессе источников информации методологии научно-технологической деятельности, приведшей к значимым результатам. За недостаточностью в этом плане существующей учебной литературы, ограничивающейся, как правило, изложением лишь результатов научно-технологического развития и придерживающейся в построении материала отличной от действительной, а часто и инверсной по отношению к ней, логики, на первый план выступает научная и научно-техническая литература.

Особого внимания заслуживают Нобелевские лекции, отражающие опыт научно-технологической деятельности, приведшей к выдающимся по своему значению достижениям. Изучение содержания этих лекций позволяет почерпнуть из первых рук информацию об истоках проблемы, подлежащих решению задач, особенностях методологии поисковой деятельности, включая ее нелинейность, тенденциях и перспективах развития, способствует повышению у обучающихся самооценки, уверенности в своих возможностях.

Во-вторых, основательность содержания информационных источников в плане развития у обучающихся самостоятельности в овладении требуемыми для научно-технологической деятельности знаниями и умениями. Речь идет прежде всего о повышении удельного веса материала, методически представленного таким образом, что его освоение не сводится к запоминанию данной в готовом виде информации, а требует самостоятельной продуктивной деятельности. В качестве такого материала могут выступать, например, методы экспериментального решения задач, модели функциональных объектов и процессов [8, 9].

В-третьих, представленность в информационных источниках содержания проблематики перспективных направлений научно-технологического развития. Это преследует две цели: формирование у обучающегося опыта освоения такого содержания и создание оснований для осуществления в образовательном процессе специализации в области актуальных на момент обучения и в ближайшей перспективе проблем. Достижение этой цели требует привлечения в качестве информационных источников монографий, научных обзоров и набирающих в последнее время силу учебников-монографий.

6. Повышение уровня кадрового обеспечения образовательной деятельности.

Речь идет о достижении качественно более высокого уровня кадрового обеспечения образовательной деятельности в военно-инженерном вузе как едва ли не важнейшем резерве совершенствования подготовки обучающихся к научно-технологической деятельности.

Осуществляющий такую подготовку преподаватель вуза должен не только обладать личностными знаниями и реализованным опытом деятельности в научно-технологической сфере, но и быть развивающейся в ней, совершенствующей своей компетентности личностью. Только такой преподаватель, способный пропустить представляемый учебный материал через призму личностного восприятия, опыта собственной деятельности, может должным образом мотивировать курсантов к продуктивному обучению, вовлечь их в решение актуальных научно-технологических проблем.

Принципиально необходимо, чтобы преподаватель вуза находился в позиции исследователя, реализующего свои знания и опыт в совершенствовании подготовки обучающихся к научно-технологической деятельности, прогрессивном преобразовании научно-образовательного пространства военно-инженерного вуза.

К последним относятся отвечающие интересам научно-технологического развития и оправданные с дидактических и методологических позиций тематическое расширение содержания обучения, обновление его организационных форм и методов, учебно-методического, педагогико-технологического обеспечения, информационных ресурсов образовательного процесса.

Основными ориентирами инновационной деятельности преподавателя должны быть раскрытие, развитие и реализация интеллектуального и творческого потенциала обучающегося, становление его как субъекта самостоятельной деятельности, способного к приобретению и

продуктивному применению знаний в решении профессионально значимых проблемных задач, изыскание новых эффективных способов образовательной деятельности в военно-инженерном вузе с опорой на использование современных технических средств.

Наряду с методами исследовательской деятельности в обучении преподаватель вуза может и должен привнести в образовательный процесс присущий ей стиль общения между субъектами, диалогичность в обмене опытом. Основной функцией преподавателя в образовательном процессе как ведущего сотрудника должно являться создание условий для самостоятельной деятельности обучающихся, реализуемой в полномасштабном решении проблемных задач.

7. Индивидуализация и дифференциация в обучении.

Подготовка в военно-инженерном вузе к научно-технологической деятельности станет более результативной, если она будет осуществляться адресно, с учетом личностных способностей обучающегося.

Это предполагает, в первую очередь, дифференциацию целевых ориентиров подготовки. Для большинства обучающихся таковым должна быть сформированность готовности к освоению и осознанному практическому применению наукоемких военных технологий, технологических методов и средств противоборства. К совершенствованию существующих и разработке новых военных технологий должна быть призвана подготовка тех обучающихся, которые обладают способностями к научному поиску, претворению его результатов в инженерных решениях, реализации последних в профессионально значимых технологических новациях.

Соответственно целевым установкам должна осуществляться дифференциация и содержания обучения – объема и уровня сложности учебного материала, направленных на его освоение задач.

Обладающим способностями к осуществлению полномасштабной научно-технологической деятельности обучающимся должны быть предоставлены возможности выбора индивидуальной траектории обучения, его организационных форм и методов и, что важно в плане самоорганизации, приобретения в образовательном процессе профессионального опыта специализации в определенной, отвечающей профилю подготовки в вузе области знаний и деятельности.

Особенно важным является создание условий для становления у обучающихся субъектной позиции, индивидуального стиля мышления и действий, проявляющихся в восприятии изучаемого проблемного поля, выделении в нем собственной задачи, творческой самостоятельности в ее постановке и решении, критически-рефлексивном самоанализе приобретенных знаний и опыта, выборе направлений дальнейшей работы.

Осуществление индивидуализации и дифференциации в подготовке к научно-технической деятельности с необходимостью требует принятия и реализации определенных организационных решений. Прежде всего, формирования из поступающих в вуз абитуриентов, обладающих наивысшими в профильных дисциплинах показателями, учебных групп с углубленной исследовательской подготовкой. Такая практика, доказавшая свою результативность, существует, например, уже на протяжении ряда лет в Военной академии связи им. С. М. Будённого.

8. Реализация в образовательном процессе возможностей, открываемых применением информационных и коммуникационных технологий.

Современная научно-технологическая деятельность с характерным для нее гигантским и всевозрастающим объемом подлежащей обработке и освоению информации, интенсивными, требующими интерактивного взаимодействия между субъектами, исследованиями и разработками, необходимостью оперативного решения масштабных технологических задач немислима без применения информационных и коммуникационных технологий (ИКТ). Использование доказавших свою эффективность в профессиональной деятельности ИКТ в образовательном процессе является существенным резервом в совершенствовании подготовки будущих военных специалистов к научно-технологической деятельности.

Наиболее значимые в рассматриваемом аспекте возможности, открываемые применением ИКТ, состоят в следующем:

- расширении информационного поля самообразовательной и информационно-аналитической деятельности посредством предоставления обширного электронного ресурса;
- устранении связанного со сложностями математического аппарата ограничения в формировании содержания обучения, осуществлении отбора подлежащего освоению учебного материала из соображений профессиональной целесообразности;
- расширении предметной области самостоятельной деятельности обучающихся по решению проблемных технологичных задач;
- интеллектуализации процесса обучения: сосредоточении деятельности обучающихся на требующей высокого уровня организации умственной работе, т. е. на постановке проблемной задачи, построении модели объекта изучения, алгоритма решения и программы, обеспечивающей его реализацию, интерпретации и практических приложениях полученных результатов;
- анализе поведения изучаемых объектов в различных и широко изменяющихся, включая нереализуемые в натурном эксперименте, условиях;
- компьютеризированном проектировании технологических объектов и процессов с необходимыми функциональными характеристиками.

В реализации указанных возможностей в образовательной практике оказываются востребованными и, соответственно, развиваемыми столь важные для профессиональной научно-технологической деятельности личностные качества, как операциональность, системность, гибкость мышления, методологическая культура, творческая самостоятельность.

Нельзя не отметить и ресурсность конструктивного применения ИКТ в решении научно-технологических задач в плане развития у обучающегося умений и опыта исследовательской деятельности и, прежде всего, осуществления компьютерного (вычислительного) эксперимента во всех его системно связанных между собой компонентах.

9. Качественно новый уровень оценивания результатов образовательной деятельности.

Существенным резервом в совершенствовании подготовки в военно-инженерном вузе к научно-технологической деятельности является повышение в оценивании результатов обучения значения показателей, отражающих сформированность у обучающегося готовности к ней критериев. Это означает, по существу, переход к качественно новому, более высокому уровню оценивания результатов обучения, в контроле которых до настоящего времени доминирует воспроизведение обучающимся предоставленной ему в образовательном процессе информации.

Основанием для определения адекватных целям подготовки к научно-технологической деятельности показателей может служить критериальная база контроля качества результатов и эффективности обучения [10].

С критериальными в контроле качества результатов образовательного процесса широтой опыта может корреспондироваться полнота сформированности у обучающегося необходимых для осуществления научно-технологической деятельности умений, определяемая посредством элементного анализа выполнения контрольных проектно-исследовательских заданий, уровнем усвоения деятельности – сформированность умений осуществления деятельности различного характера: алгоритмизированной и требующей проявления креативности, фиксируемая в решении задач соответствующих типов, осознанностью выполнения действий – наличие умений обоснованного выбора методов и средств решения задачи, обобщенностью действий – уровень деятельностной активности в актуализации и использовании приобретенных умений и опыта в постановке и решении новых проблемных задач.

Характеризующим эффективность обучения, определяемую на основе праксиологического подхода обученности – уровень освоенности предоставленной в образовательном процессе информации, ее трансформации в знания; обучаемости – наличие умений самостоятельно приобретения необходимых знаний, конструктивного освоения профессионально

значимых достижений науки и технологий, адаптируемости – наличие устойчивой мотивации к профессиональному развитию, обновлению своих компетентностей в освоении содержания проблематики и разработке перспективных направлений научно-технологического развития.

В оценивании результатов образовательной деятельности преподавателя вуза первостепенное значение должно придаваться его творческому вкладу в развитие учебно-методического, информационного и педагогико-технологического обеспечения подготовки обучающихся к научно-технологической деятельности, организацию самостоятельной работы и специализации обучающихся в пространстве ее актуальных проблем.

10. Расширение образовательного пространства подготовки к научно-технологической деятельности.

Важную роль в повышении уровня подготовки военных специалистов к научно-технологической деятельности может играть задействованность в ней системы довузовского образования, обучения в специализированной школе (Кадетском корпусе), такой, например, как Школа IT-технологий, являющаяся структурным подразделением Военной академии связи.

Осуществление подготовки к научно-технологической деятельности, начиная со старших классов школы, открывает возможности не только увеличения ее временного ресурса, но и что особенно важно, реализации имеющегося в этом возрасте у обучающегося потенциала развития интеллектуальных и творческих способностей.

В едином для школы и вуза научно-образовательном пространстве должны быть обеспечены:

– непрерывность и систематичность в освоении научно-технологической деятельности на всем протяжении обучения с соблюдением должной динамики в расширении содержания обучения от общенаучных представлений до передовых достижений науки и технологий в изучаемой области;

– адекватная целям освоения образовательного процесса сложность решаемых задач;

– повышение уровня самостоятельности обретения компетенций – от познавательного к профессиональному;

– рост требований к результатам – от приобретения субъективно новых знаний до логически завершенного решения актуальных профессиональных задач.

Такая подготовка обеспечивает реализацию предписываемой дидактикой цели образования как приобретения опыта осуществления всего спектра существующих видов деятельности, ведущей к формированию способностей [11].

Целесообразно и включение в образовательное пространство операторов научных рот, формируемых из выпускников ведущих инженерных вузов. Особенно значимы здесь два момента. Во-первых, задание для курсантов уровня образованности, которого они должны достигнуть в результате обучения в военно-инженерном вузе. Во-вторых, возможности, открываемые результатами выполняемых операторами научных рот работ в решении задач совершенствования подготовки курсантов к научно-технологической деятельности.

Наконец, еще одно значимое направление расширения образовательного пространства военно-инженерного вуза – выход в сферу научных исследований и проектов, осуществляемых в ведущих научно-технологических центрах. Результатом такой интеграции, которая может реализоваться в различных формах (проведение научно-практических семинаров, стажировок, совместных изысканий и т. п.), является приобщение обучающихся к актуальным результатам мирового уровня, придание подготовке к научно-технологической деятельности опережающего характера.

11. Развитие материально-технической базы вуза.

Подготовка будущих военных специалистов к научно-технологической деятельности не может быть полноценной без приобретения ими опыта практического освоения современных технологий, что с необходимостью требует соответствующего, не уступающего ведущим вузам страны, материально-технического обеспечения образовательного процесса.

Осознание этого факта руководством и научно-педагогическим сообществом способно привести, как показывает опыт последних лет, к позитивным сдвигам в оснащении военно-инженерного вуза современным технологическим и аналитическим оборудованием.

Так, в обучении и военно-научной работе курсантов Военной академии связи и воспитанников Кадетского корпуса (Школы IT-технологий) в настоящее время продуктивно используются составляющие инструментарий нанотехнологий сканирующие зондовые микроскопы, позволяющие осуществлять анализ морфологии поверхности функциональных микроструктур, распределение по ее площади представляющих интерес параметров, оценивание качества технологических процессов создания функциональных элементов электроники нанометровых размеров.

В части программно-аппаратных и информационных комплексов образовательного и научного назначения отметим как существенную в рассматриваемом аспекте необходимость развития средств компьютерной поддержки проводимых на научно-технологическом оборудовании работ с использованием для этого наиболее рациональных технических решений. Таковым, например, является управление зондом сканирующего микроскопа программой на языке C++, технически осуществляемое посредством задействования ядра компьютерного процессора.

12. Придание образовательной системе адаптивности по отношению к современным динамично изменяющимся реалиям.

Система подготовки военных специалистов с необходимостью должна оперативно реагировать на происходящие в науке и технологии стремительные изменения, отвечать определяемому как ключевому в эпоху цифровых информационных технологий принципу гибкости.

В этой связи приоритетными становятся следующие задачи. Во-первых, придание образовательному пространству военно-инженерного вуза открытости по отношению к актуальным достижениям научного и технологического прогресса. Это ставит перед преподавателями вуза задачу актуализации своих знаний и опыта для освоения содержания проблематики перспективных направлений научно-технологического развития, его дидактической адаптации, обеспечения реализации ресурсов содержания обучения в плане мотивации обучающихся к учебной деятельности, формирования у них умений и опыта ее осуществления, основательности для будущего профессионального развития.

Во-вторых, постановка новых учебных дисциплин, отвечающих присущему научно-технологической деятельности интегративному единству фундаментальной и практической составляющих ее содержания. Примерами таковых являются разработанные и реализуемые в Военной академии связи дисциплины «Физика материалов и компонентов техники связи» и «Физические основы микро- и наноэлектроники».

В-третьих, разработка и реализация новых стратегий обучения и отвечающих им образовательных практик, адекватных особенностям мировосприятия обучающихся. В этой связи, в организации образовательного процесса, наряду с непосредственно отвечающими научно-технологической деятельности исследовательским и проектным (проектно-исследовательским) методами, должны использоваться и другие активные методы обучения, такие, как игровые методы и основанные на принципах проблемно-деятельностного обучения методы кейсов с присущими им интерактивностью, востребованностью креативности, основательностью в формировании опыта целенаправленной деятельности.

Список используемых источников

1. Компетентностный подход в педагогическом образовании: моногр. / под ред. В. А. Козырева, Н. Ф. Радионовой, А. П. Тряпицыной. – СПб.: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2008. – 392 с.

2. *Кондратьев А. С.* Физическое понимание и его уровни // Вестник Северо-Западного отделения РАО. – 1998. – Вып. 2. – С. 137–144.
3. *Кудрявцев Т. В.* Психология технического мышления. – М.: Педагогика, 1975. – 303 с.
4. *Рубинштейн С. А.* О мышлении и путях его исследований. – М.: Изд-во АН СССР, 1958. – 151 с.
5. *Матюшкин А. М.* Психология мышления. Мышление как разрешение проблемных ситуаций. – М.: Изд-во КГУ, 2009. – 190 с.
6. *Решетова З. А.* Психологические основы профессионального образования. – М.: Изд-во МГУ, 1985. – 207 с.
7. *Волкова В. В.* Инновационные практики в подготовке военных кадров в ВАГШ ВС РФ // Развитие военной педагогики в XXI веке: материалы VII межвузовской научно-практической конференции / под ред. С. В. Костарева [и др.]. – СПб.: ВАС, 2020. – С. 203–210.
8. Проблемно-деятельностный подход к организации учебного процесса в военном вузе как средство формирования у курсантов методологической культуры / С. В. Костарев [и др.] // Развитие военной педагогики в XXI веке: материалы V межвузовской научно-практической конференции / под ред. С. В. Костарева, И. И. Соколовой, Н. В. Ершова. – СПб.: ВАС, 2018. – С. 39–46.
9. *Жуков В. А., Пицелко Н. С.* Формирование умений и опыта применения фундаментальных знаний к решению прикладных проблемных задач средствами физического образования // Развитие военной педагогики в XXI веке: материалы VII межвузовской научно-практической конференции / под ред. С. В. Костарева [и др.]. – СПб.: ВАС, 2020. – С. 333–339.
10. *Остроумова Ю. С.* Совершенствование подготовки военно-инженерных кадров к решению наукоемких профессиональных задач: моногр. – СПб.: ВАС, 2019. – 240 с.
11. *Дьюи Дж.* Демократия и образование. – М.: Педагогика-Пресс, 2000. – 384 с.

Н. С. Кужекин,
кандидат философских наук, профессор;
В. В. Мышко,
кандидат технических наук, доцент;
В. А. Чикуров,
кандидат технических наук, доцент

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ ОБУЧАЮЩИХСЯ В ВОЕННОМ ВУЗЕ

В статье представлена система контроля успеваемости как совокупность форм текущего контроля успеваемости обучающихся. Проанализированы формы, установленные тематическим планом и избранные преподавателем. Подчеркнуто особое место рубежного контроля в системе текущего контроля успеваемости.

Ключевые слова: результат обучения, форма контроля, технология проведения контроля.

В процессе реализации образовательного процесса особое место принадлежит контролю успеваемости как основному инструменту диагностики результатов обучения.

Система контроля успеваемости – это основной источник информации для выработки управляющих воздействий по управлению процессом подготовки слушателей и курсантов.

Проблемы контроля успеваемости в разных коллективах решаются по-разному, так как руководящие документы не дают конкретного способа решения. В кафедральных коллективах академии накопился определенный опыт осуществления контроля успеваемости. Некоторые аспекты контроля и диагностики обучающихся рассмотрены в ряде работ [1–6]. Вместе с тем ряд актуальных вопросов не имеют однозначного решения и нуждаются в дальнейшем совершенствовании. Авторы предлагают один из подходов, реализованный в ВКА имени А. Ф. Можайского, направленный на решение проблем контроля успеваемости обучающихся.

Систему контроля успеваемости можно представить в виде модели (рис. 1).

Текущий контроль успеваемости (ТКУ) необходим на протяжении всего учебного процесса, так как позволяет проверить насколько усвоен учебный материал и способствует совершенствованию методики проведения занятий [7].

В настоящей статье проводится анализ существующих проблем функционирования системы текущего контроля успеваемости, а именно:

- 1) определение уровня сформированности компетенции как результата обучения по дисциплине;
- 2) выбор формы проведения текущего контроля успеваемости обучающихся;
- 3) выбор форм рубежного контроля.

Первая проблема функционирования системы текущего контроля успеваемости обучающихся в военном вузе – это измеримость компетенций, как результатов обучения по дисциплине.

В структуре любой рабочей программы учебной дисциплины (модуля), как правило, в первом разделе определяется цель ее освоения в рамках основной профессиональной образовательной программы (ОПОП) [2].

Для подготовки специалиста необходимо освоение определенного набора компетенций. Совокупность осваиваемых компетенций, необходимых для конкретной специализации, определяет направленность ОПОП и соответствующий набор учебных дисциплин и практик, в рамках которых эти компетенции формируются. В то же время результаты обучения на сегодняшний день явным образом трудно представить, так как общепринятые единые методы

измерения компетенций в системе образования отсутствуют. Авторы предлагают решать задачу оценивания компетенций следующим образом. В результате текущего контроля успеваемости обучающийся получает общую оценку (табл. 1), числовые значения которой соответствуют уровню оценочных суждений об уровне сформированности компетенции.

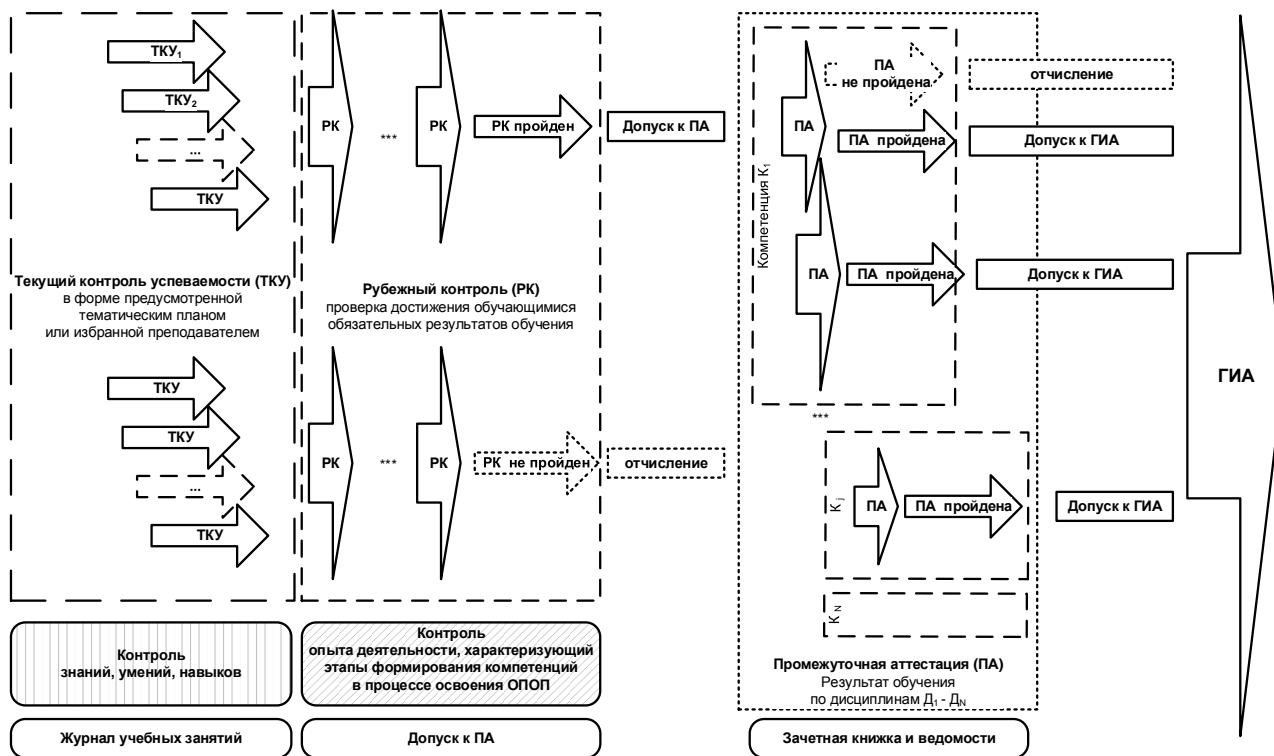


Рис. 1. Модель контроля успеваемости обучающегося

Таблица 1

Критерии оценивания степени сформированности компетенций

Результаты ответов на отдельные вопросы	Уровень сформированности компетенции	Общая оценка
Более 50% ответов на оценку «отлично», остальные – на «хорошо»	Компетенция сформирована на высоком уровне	«отлично» / «зачтено»
Более 50% ответов на оценки «хорошо» и (или) «отлично», остальные – на «удовлетворительно»	Компетенция сформирована	«хорошо» / «зачтено»
Более 50% ответов на оценку «удовлетворительно» и (или) есть ответы на оценку «неудовлетворительно» (не более 10%)	Компетенция сформирована в основном	«удовлетворительно» / «зачтено»
Более 10% ответов на оценку «неудовлетворительно»	Компетенция не сформирована	«неудовлетворительно» / «не зачтено»

По мнению авторов, уровень сформированности компетенции должен отражать достигнутый результат: компетенция сформирована на высоком уровне, компетенция сформирована, компетенция сформирована в основном, компетенция не сформирована.

Вторая проблема функционирования системы контроля успеваемости – это выбор формы проведения текущего контроля успеваемости обучающихся.

Рассмотрим более подробно особенности проведения текущего контроля с точки зрения проблемы оценивания компетенций обучающихся, сформированных в результате изучения дисциплин.

В контексте будущей профессиональной деятельности специалиста в рабочих программах учебных дисциплин указываются индикаторы достижения компетенции, уточняющие и раскрывающие формулировку компетенции в виде конкретных действий, которые выпускник должен быть способен продемонстрировать в ходе контроля, что подтвердит освоение данной компетенции.

Выбор соответствующей формы контроля успеваемости позволит, в случае необходимости, выполнить своевременно коррекцию системы подготовки и активизировать учебную работу. По результатам контроля обучающийся может уяснить свои достижения и недостатки, накопившиеся при изучении учебной дисциплины, а преподаватель может направить деятельность обучающегося и при необходимости указать на то, какой материал нужно изучить.

Существует несколько форм проведения *текущего контроля* успеваемости (ТКУ). Эти формы предусматриваются тематическим планом или могут быть избраны преподавателем самостоятельно (рис. 2).

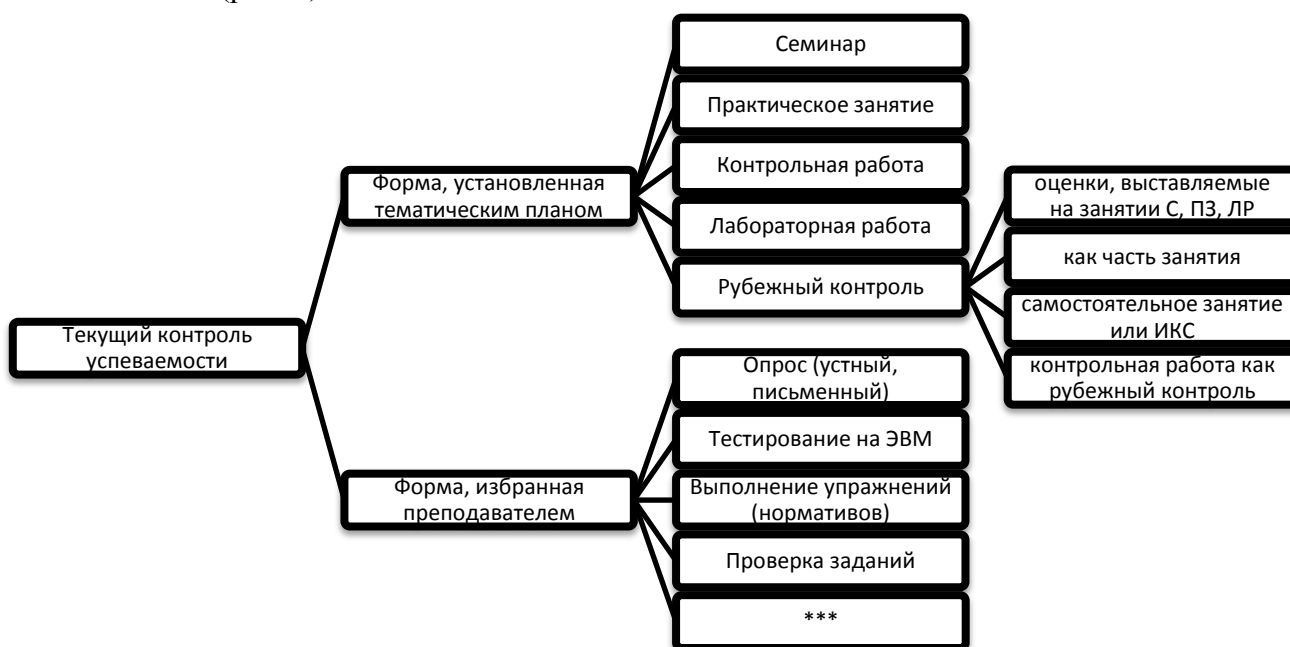


Рис. 2. Классификация форм проведения контроля успеваемости

Оценка уровня подготовленности слушателей и курсантов по дисциплинам учебного плана проводится на основе фондов оценочных средств. Типы оценочных заданий из фонда оценочных средств по направленности могут учитывать освоение вида деятельности в целом или отдельных компетенций.

Тематическим планом устанавливаются виды занятий, такие как семинар (С), практическое занятие (ПЗ), контрольная работа, лабораторная работа (ЛР), в ходе которых оценивается каждый обучающийся, например, при выполнении *лабораторных работ* по дисциплине от обучающихся требуется представление отчетов и их последующая защита [7].

Наиболее сложная форма в плане подготовки «сценария» проведения обучающих занятий – это *семинар*. Семинар предполагает интерактивность и общение между преподавателем (ведущим) и обучающимися (аудиторией).

Контрольная работа – это одна из основных форм проверки знаний обучающихся, как правило, состоит из нескольких заданий на конкретную тему, предназначена для определе-

ния качества усвоения программного материала по конкретной теме и объективного оценивания уровня приобретенных знаний за определенный период.

Перечисленные выше формы проведения текущего контроля успеваемости обучающихся, устанавливаются тематическим планом.

В системе ТКУ особое место занимает *рубежный контроль* (РК). С одной стороны – это вид текущего контроля успеваемости, но с другой стороны – его результаты важны для обучающегося с точки зрения определения необходимых условий допуска к промежуточной аттестации (см. рис. 1) [8], поэтому выбор формы проведения РК составляет **третью проблему** функционирования системы контроля успеваемости.

Прохождение рубежного контроля свидетельствует о том, что освоен необходимый минимум, который требуется обучающемуся для выполнения программных требований к уровню подготовки. Для проведения рубежного контроля на этапе разработки рабочей программы учебной дисциплины выделяются наиболее сложные или объемные темы (разделы) учебной дисциплины и устанавливаются формы контроля. В рабочих программах учебных дисциплин предусматривается график проведения рубежного контроля успеваемости обучающихся, в котором должны быть указаны номера всех тем учебной дисциплины, по которым осуществляется рубежный контроль, также указываются формы рубежного контроля и время, выделенное на его проведение. В дальнейшем этот график находит отражение при разработке тематического плана.

Непосредственно во время проведения РК формируются материалы, которые подтверждают его прохождение и в дальнейшем хранятся до проведения промежуточной аттестации по дисциплине. Если нет положительной оценки за какой-либо этап рубежного контроля, то обучающиеся к промежуточной аттестации по дисциплине не допускаются.

Выбор форм рубежного контроля возможен из следующих вариантов (см. рис.2):

1) рубежный контроль – вид текущего контроля успеваемости, следовательно, результатом может служить оценка, выставляемая на занятии (семинаре, практическом занятии, лабораторной работе и др.);

2) рубежным контролем может служить часть занятия, в этом случае в графике указывается время, выделенное на его проведение, например при проведении 4-х часового занятия практической направленности под рубежный контроль можно выделить 1-2 часа;

3) рубежный контроль, как самостоятельное занятие, например учебное занятие других видов (индивидуальное контрольное собеседование);

4) контрольная работа как рубежный контроль.

Преподаватель обладает определенной свободой в выборе форм проведения текущего контроля и может самостоятельно избрать такую, которая не зафиксирована в тематическом плане. Так, формами проведения текущего контроля успеваемости могут служить устный или письменный опрос, тестирование на ЭВМ, выполнение упражнений (нормативов) или проверка заданий. При проведении такого контроля за один раз, как правило, опрашивается не более тридцати процентов обучающихся (если это не фронтальный опрос).

В отличие от ТКУ, проводимого в форме, которая предусмотрена тематическим планом, *текущий контроль по выбору преподавателя* дает возможность провести оперативное диагностирование знаний и умений обучающихся и последующую коррекцию при проведении образовательного процесса, так как полученные результаты позволяют понять, кто усвоил изучаемый материал, а кому следует «подтянуть» свои знания и повторно поработать над вопросом или темой.

Формой, позволяющей не только контролировать знания обучающихся, но и сразу жеправлять, повторять и закреплять их знания, умения и навыки, является *устный* или *письменный опрос*. При этом различают фронтальный (охватывающий сразу несколько обучающихся) и индивидуальный (позволяющий сконцентрировать внимание на одном обучающемся) опросы. Устный опрос более гибкий, чем письменный, к тому же позволяет поддерживать контакт с обучающимся, развивает устную речь, однако он оставляет часть

обучающихся пассивными и требует много времени. Однако практические навыки удобнее проверять помощью письменного.

Тестирование на ЭВМ позволяет проводить уровень подготовки обучающихся, оценивание и выдачу им результатов с помощью персонального компьютера. Компьютерное тестирование можно проводить как выборочно, так и по всем вопросам темы, что мобилизует обучаемых на тщательную подготовку к занятию. Игровая форма решения тестовых заданий усиливает мотивацию, так как в большинстве случаев у обучающихся появляется желание «выиграть» у компьютера.

Выполнение упражнений (нормативов) применяется, как правило, при оценивании практических действий. Такими могут быть, например, упражнения по физической подготовке или нормативы по огневой подготовке, а также по РХБЗ.

Преподаватель должен осуществлять систематический контроль проведения не только аудиторных занятий, но и оценивать результаты самостоятельной работы обучающихся, которые в дальнейшем учитываются в ходе промежуточной аттестации по изучаемой дисциплине. Поэтому при ТКУ в качестве контрольных мероприятий усвоения рабочей программы дисциплины преподаватель может избрать форму, заключающуюся в *проверке заданий*.

Объективно существует определенное соотношение между видами занятий и формами контроля, которые может выбрать преподаватель для оценивания соответствующих индикаторов. Так, в начале лекции для организации контроля готовности обучающихся к занятию, а в конце – для оценки степени усвоения учебного материала преподаватель может выбрать форму устного или письменного опроса на конкретные вопросы. При этом можно оценить элементарные знания по пройденному материалу и теме занятия.

Подводя итог всему вышесказанному относительно функционирования системы контроля образовательной деятельности, можно сделать следующие выводы:

- существующая система текущего контроля успеваемости способна оценить компетентность выпускника и его профессиональной пригодности;
- рубежный контроль проводится для проверки достижения обучающимися обязательных результатов обучения по дисциплине;
- проведение контроля успеваемости позволяет получать регулярную информацию о текущем состоянии образования, оперативно выявлять отклонения в образовательном процессе и на этой основе вырабатывать корректирующие и предупреждающие действия. Своевременное принятие мер по устранению выявленных проблем способствует точному выполнению требований по военно-профессиональной подготовке выпускников в части достижения обучающимися установленных результатов освоения основной профессиональной образовательной программы.

Список используемых источников

1. Калинин В. Н. Основные направления формирования и критерии оценивания общекультурных и профессиональных компетенций в цикле математических и естественнонаучных дисциплин // Информационный бюллетень № 121. Методика формирования и оценивания компетенций обучающихся. – СПб., 2014. – С. 19–26.
2. Чикуров В. А., Зиновьев В. Г., Мышко В. В. Система оценивания уровня сформированности компетенций у слушателей и курсантов академии // Информационный бюллетень № 126. Профессиональная компетентность преподавателя академии. – СПб., 2015. – Часть вторая. – С. 4–11.
3. Кужекин Н. С., Чикуров В. А., Зиновьев С. В. Фонд оценочных средств как компонент основной профессиональной образовательной программы // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2015. – Вып. 648. – С. 202–209.

4. Алтухов А. И., Калинин В. Н., Чебурков М. А. Об опыте формирования и оценивания компетенций по дисциплинам профессионального цикла в системе военного образования // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2016. – Вып. 650. – С. 204–209.

5. Оценивание уровня сформированности компетенций выпускников военно-учебного заведения в ходе государственной итоговой аттестации / В. В. Алейник [и др.] // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2017. – Вып. 656. – С. 189–197.

6. Оценивание выпускной квалификационной работы в военно-учебном заведении в ходе государственной итоговой аттестации / Н.С. Кужекин [и др.] // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 661. – С. 225–234.

7. Об организации образовательной деятельности в федеральных государственных организациях, осуществляющих образовательную деятельность и находящихся в ведении Министерства обороны Российской Федерации: приказ Министра обороны РФ № 308 от 30 мая 2022 г. – М-во юстиции РФ, 2022. – 72 с.

8. Об образовании в Российской Федерации: федер. закон № 273-ФЗ от 29.12.2012 (с изм. и доп., вступ. в силу 01 янв. 2022 г.) – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_140174 (дата обращения: 14.02.2022).

Н. В. Селихина,
кандидат военных наук;
М. Н. Слюсарев,
кандидат военных наук

МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ ОСОБЫХ УСЛОВИЙ ВОЕННОЙ СЛУЖБЫ ПО СТЕПЕНИ ОПАСНОСТИ ДЛЯ ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ПРОЦЕДУРЕ УСТАНОВЛЕНИЯ ЕЖЕМЕСЯЧНОЙ НАДБАВКИ К ДЕНЕЖНОМУ ДОВОЛЬСТВИЮ ВОЕННОСЛУЖАЩИХ

Нам бы хотелось создать такие условия, при которых не служить в армии было бы неприлично, а служить – престижно.

Генерал армии С. К. Шойгу

В статье рассматривается методический аппарат, используемый в процедуре оценивания особых условий военной службы с целью обоснования правильного назначения ежемесячной денежной выплаты военнослужащим контрактной службы, который учитывает медико-физиологические аспекты, влияющие на эмоциональное состояние военного человека в различных условиях обстановки.

Ключевые слова: особые условия военной службы, перечень воинских должностей, методика, физиологическое состояние организма, классы особых условий, интегральный показатель, критерий, балл, карта боевого поста.

Выступая на расширенной коллегии Минобороны России в декабре 2021 года, Президент Российской Федерации – Верховный Главнокомандующий Вооруженными Силами Российской Федерации Владимир Путин, в частности, сказал: «Защитники Родины выполняют особые задачи, зачастую очень сложные, ответственные, связанные с риском, и мы будем добиваться, чтобы за свою службу они получали достойное вознаграждение» [1]. В связи с этим одна из проблем, которая требует урегулирования, заключается в отсутствии целостной точки зрения и единой методики определения перечня должностей, замещаемых военнослужащими по контракту, для выплаты ежемесячной надбавки к денежному довольствию за особые условия военной службы (ОУВС). Известно, что правила выплаты надбавки определяются Постановлением Правительства Российской Федерации № 1073 от 21 декабря 2011 года. Главное правило выплаты – прохождение военнослужащими службы на военных должностях, объектах и территориях, входящих в соответствующие списки. Но в то же время причины и порядок отнесения той или иной должности и вида деятельности в ту или иную социально защищенную категорию военнослужащих ни в этом, ни в других нормативных актах не формулируются. В связи с этим у военнослужащих, не попадающих в соответствующие перечни связанных с ОУВС воинских должностей, возникают сомнения в справедливости оценки их ратного труда. В этой статье представлен вариант методики, который в какой-то степени должен помочь в решении вышеизложенной задачи [2].

Поскольку в документах не приводится четкой и однозначной формулировки термина «особые» применительно к военной службе, мы дадим свое определение. Под ОУВС мы будем понимать множественность факторов военной службы и окружающей среды, оказывающих воздействие на трудоспособность и состояние военнослужащего при осуществлении им профессиональной служебной деятельности. Уточним, что денежная ежемесячная надбавка, которая, как правило, выплачивается в таких условиях, не является самоцелью, а использует-

ся как средство в обеспечении специальных социальных гарантий военнослужащим для повышения престижа военной службы.

В то же время не менее важным направлением в этом процессе является проектирование и осуществление определенных шагов, направленных на оптимизацию ОУВС, снижение уровня факторов, которые делают условия службы особыми, а в идеале и на минимизацию номенклатуры особых условий, в которых может проходить военная служба.

К шагам такого рода следует отнести поиск критериев, позволяющих ориентироваться в многообразном описании характеристик ОУВС, и разработку методики процедуры оценивания особых условий. Критерий должен помочь в оценивании совокупного влияния медико-физиологических аспектов на эмоциональные состояния военнослужащих в различных обстоятельствах, а методический аппарат должен быть использован в процедуре идентификации¹ ОУВС.

Значимым является то обстоятельство, что ОУВС являются неотъемлемой частью более объемного концептуального понятия «безопасность военной службы», к которому, как известно, предъявляются конкретные требования. В этом смысле грамотно принятое решение по процедуре идентификации особых условий мы вправе считать одним из мероприятий по обеспечению безопасности военной службы в целом.

Уточним существенный момент. Из определения понятия ОУВС, не сложно видеть, что основную роль в существе данного словосочетания играют факторы окружающей среды и самой военной службы. Под факторами мы будем понимать разнообразные уровни и концентрации влияния среды и службы, крайнее выражение которых имеет предельно допустимые концентрации и уровни (ПДК и ПДУ). Также мы включаем сюда повышенную психофизическую и нервно-эмоциональную нагрузку на организм военнослужащего, связанную с руководством личным составом.

Опираясь на приведенные в специальной литературе врачебные результаты обследований труда сотрудников в сложных и опасных условиях и сравнивая понятия «особые условия труда» и «особые условия военной службы», весьма логично выделить несколько классов ОУВС по критерию их воздействия на функциональное состояние организма (ФСО) военнослужащего (рис. 1). Предлагаемый классификатор позволит численно оценивать суммарную информацию об особых условиях без всякого кропотливого и продолжительного медицинского обследования.



Рис. 1. Классы особых условий военной службы

¹ **Идентификация** – установление тождественности неизвестного объекта известному на основании совпадения признаков.

К *первому классу* отнесем условия с допустимой внешней средой при терпимой физической, мыслительной и нервно-психологической нагрузках. У практически здоровых² военнослужащих такие условия оптимизируют подготовленность организма и его адаптивность к преодолению тягот службы. Утомление на конец недели (дежурства в дежурных боевых сменах) незначительно. На протяжении всего периода военной службы сохраняются здоровье и высокая функциональная готовность. Такое состояние организма является наилучшим вариантом нормальной функциональности военнослужащего, находящегося в особых условиях.

К *второму классу* следует отнести условия с неизменным использованием словосочетаний ПДК и ПДУ воздействующих факторов по санитарным нормам и экологическим компонентам. У практически здоровых военнослужащих к концу недели (дежурства в дежурных боевых сменах) не появляется существенного перенапряжения. Утомление и степень мобилизации функций организма коррелируют величине характерной профессиональной нагрузки по занимаемой должности. Трудоспособность значительно не ухудшается в течение всего периода военной службы, отклонений в состоянии здоровья, связанных со служебной деятельностью, не наблюдается.

К *третьему классу* мы отнесем условия, когда в результате превышения ПДК и ПДУ воздействующих факторов, у практически здоровых военнослужащих формируются реакции, характерные для пограничного состояния организма. Характеристики физиологических функций меняются в промежутках между дежурствами и особенно к концу недели по сравнению с изначальным уровнем. Ухудшаются показатели функциональности при выполнении должностных обязанностей, увеличивается желательный восстановительный период. Если адаптироваться к условиям и чаще использовать периоды отдыха, то можно довольно быстро нейтрализовать негативные дисбалансы.

Четвертый класс условий привязан к значениям, превышающим ПДК и ПДУ характеристик факторов, определяющих реальные условия службы. Процессы, происходящие в организме военнослужащих, имеют тенденцию приближения к характеристикам предпатологического³ состояния. Большинство показателей функций организма при этом обостряются в любых ситуациях выполнения служебных обязанностей. Растет уровень обычной заболеваемости, появляются профессиональные заболевания, вырастает травматизм. Решение поставленных задач реализуется за счет перенапряжения организма военнослужащего.

К *пятому классу* относятся условия, в которых базовую роль играют экстремальные значения ПДК и ПДУ уже упомянутых факторов и нагрузок, воздействующих на военнослужащих. Довольно быстро наступает патологическое функциональное состояние организма. Наблюдается нехватка некоторых элементов в значимых системах. Появляются плохие реакции со стороны центральной нервной системы. У большинства военнослужащих патологические реакции пропадают после надлежащего отдыха. Впрочем, у части военнослужащих с течением времени патологии могут перейти в заболевания. Профессиональная заболеваемость – характерная черта для особых условий службы пятого класса.

Наконец, к *шестому классу* отнесем особо плохие, можно сказать критические условия. В таких ситуациях патология развивается очень быстро, иногда внезапно. Наблюдаются тяжелые нарушения здоровья, имеющие часто необратимый характер, в том числе, и в результате внезапных перегрузок и острых патологических реакций на чрезвычайные происшествия.

Установлено, что факторы, характеризующие ОУВС, разнообразны по своей сущности, ориентированности и характеру влияния на военнослужащего и поэтому не могут механически суммироваться. Это означает, что необходимо отыскать такой критерий суммарного влияния на военнослужащего всех факторов, в котором учитывалась бы эта «разнокачественность» [3].

² **Практически здоровым** считается человек, у которого имеется одно или несколько хронических заболеваний, находящихся вне обострения в течение одного или нескольких лет, а заинтересованные органы и системы находятся в компенсированном состоянии.

³ **Предпатологическое** – предваряющее патологическое состояние.

В свое время в НИИ Труда⁴ была подготовлена методика численного анализа тяжести работы, в которой показатели ФСО, с одной стороны, и факторы, определяющие особые условия работы, – с другой, представлены числами-баллами, соответствующими степени регрессивно-корреляционного анализа. В итоге исследований были определены корреляционно-регрессивные зависимости между количественными значениями воздействующих факторов и формирующимися под их влиянием ФСО. Зафиксирована прямая зависимость в структурной системе «человек – среда», отображающая причинно-следственные связи между условиями труда и формированием определенной градации нагрузок на работе.

С учетом ранее найденных связей, мы будем судить о ФСО военнослужащих по характеристикам ОУВС, что облегчает решение конечной задачи, а именно, без кропотливых медико-физиологических обследований можно выяснить корреляционно-регрессивные зависимости между классом ОУВС и значением воздействующих факторов. Впрочем, на этом этапе существует одна трудность – выбор показателя оценки ОУВС. Предпочтительно в этой ситуации сформировать интегральный показатель как совокупность отдельных частных показателей, а именно частные показатели опасности и вредности среды и частные показатели напряженности процессов военной службы. При таком подходе разнородность факторов, оказывающих влияние на военнослужащего в особых условиях, достаточно полно представляет интегральный показатель опасности военной службы ($\Pi_{И}$), суть которого заключается в учете характера реального воздействия на организм нагрузок военной службы на конкретном боевом посту (рабочем месте). В этом случае каждый фактор по таблице показателей получает численную оценку в баллах от 1 (приемлемые условия) до 6 (чрезвычайно тяжелые условия) [4].

Чтобы оценить интегральную балльную опасность ОУВС, предлагается расчетный порядок, который отвечает следующим требованиям:

- интегральный показатель $\Pi_{И}$ не должен быть меньше определяющего (имеющего наибольший балл) фактора конкретных условий военной службы $\Phi_{ОПР}$;
- интегральный показатель $\Pi_{И}$ не должен быть больше шести (в соответствии с приведенным выше классификатором имеется шесть классов ОУВС);
- факторы Φ_i должны влиять на интегральный показатель $\Pi_{И}$ пропорционально своей балльной величине и числу i -х факторов.

Расчет интегрального показателя $\Pi_{И}$ ОУВС будем рассчитывать по формуле

$$\Pi_{И} = \Phi_{ОПР} + \sum_{i=1}^{n-1} \Phi_i \frac{\Phi_{\max} - \Phi_{ОПР}}{(n-1) \Phi_{\max}}, \quad (1)$$

- где Φ_{\max} – максимально возможный балл i -го фактора условий ($\Phi_{\max} = 6$);
 $\Phi_{ОПР}$ – определяющий (имеющий наибольший балл в конкретной ситуации) фактор условий ($1 < \Phi_{ОПР} < 6$);
 $\sum_{i=1}^{n-1} \Phi_i$ – сумма количественной оценки (в баллах) действующих на боевом посту факторов условий без $\Phi_{ОПР}$;
 n – число всех действующих факторов на боевом посту (рабочем месте).

Подставив соответствующие значения факторов в формулу (1), можно получить пределы изменений $\Pi_{И}$ при различных значениях $\Phi_{ОПР}$, которые приведены ниже:

$\Phi_{ОПР} = 5$	$5,31 \leq \Pi_{И5} \leq 5,9$
$\Phi_{ОПР} = 4$	$4,51 \leq \Pi_{И4} \leq 5,3$
$\Phi_{ОПР} = 3$	$3,31 \leq \Pi_{И3} \leq 4,5$
$\Phi_{ОПР} = 2$	$1,81 \leq \Pi_{И2} \leq 3,3$
$\Phi_{ОПР} = 1$	$\Pi_{И1} = 1,8$

⁴ **Институт труда (НИИ труда)** – советская, позже российская исследовательская организация в области экономики и охраны труда, существовавшая в 1955–2016 гг.

На основе этого составлена табл. 1, связывающая класс ОУВС и величину интегральной балльной оценки условий военной службы.

Таблица 1

Корреляционная таблица классов ОУВС и интегральной балльной оценки негативных факторов

Класс ОУВС	1	2	3	4	5	6
Интегральная балльная оценка факторов ОУВС	До 1,8	1,81–3,3	3,31–4,5	4,51–5,3	5,31–5,9	5,91–6

Тогда критерием выбора класса ОУВС по степени опасности будет рассматриваться попадание величины интегрального показателя в диапазон интегральной балльной оценки факторов ОУВС, определенной для данного класса:

$$W_k \rightarrow \Pi_{И} \in [C_{\min j}, C_{\max j}], \quad (2)$$

где W_k – критерий выбора класса ОУВС на рабочем месте (боевом посту);
 $C_{\min j}$ – минимально возможное значение интегрального показателя для j -го класса;
 $C_{\max j}$ – максимально возможное значение интегрального показателя для j -го класса;
 j – класс ОУВС по степени опасности, $j = (1,6)$.

Методика определения класса ОУВС может быть продемонстрирована в виде структуризации, изображенной на рис. 2. При разработке методики приняты определенные ограничения и допущения. Исходные данные заносятся в «Карту боевого поста (рабочего места) военнослужащего», которая должна являться основным документом для определения класса ОУВС на данном боевом посту (рабочем месте).

Определение интегрального показателя $\Pi_{И}$ включает в себя:

– определение балльной оценки Φ_i воздействия i -го фактора ОУВС на боевом посту (рабочем месте);

– вычисление удельного коэффициента $K_{уд i}$ воздействия i -го фактора на военнослужащего. Удельный коэффициент воздействия рассчитывается как отношение времени t воздействия i -го фактора к общей продолжительности T рабочего дня (смены несения дежурства):

$$K_{уд i} = \frac{t_i}{T}; \quad (3)$$

– вычисление удельного балла $K_{\delta i}$ i -го фактора. Удельный балл i -го фактора рассчитывается как произведение удельного коэффициента $K_{уд i}$ воздействия i -го фактора на балльную оценку Φ_i данного фактора:

$$K_{\delta i} = K_{уд i} \cdot \Phi_i; \quad (4)$$

– определение фактора ОУВС $\Phi_{\text{опр}}$, имеющего наибольшую удельную балльную оценку:

$$\Phi_{\text{опр}} = \max\{K_{\delta i}\}, \quad (5)$$

где $i \in [1, n)$;

– определение суммы количественной оценки (в удельных баллах) факторов условий без $\Phi_{\text{опр}}$:

$$\sum_{i=1}^{i=n-1} K_{\delta i}; \quad (6)$$

– определение интегрального показателя $\Pi_{И}$ опасности ОУВС:

$$\Pi_{И} = \Phi_{\text{опр}} + \left(\sum_{i=1}^{i=n-1} K_{\delta i} \frac{6 - \Phi_{\text{опр}}}{(n-1) \cdot 6} \right). \quad (7)$$



Рис. 2. Структура методики определения класса ОУВС

Все результаты вычислений заносятся в «Карту боевого поста (рабочего места) военнослужащего». Класс ОУВС по степени опасности определяется на основании попадания величины интегрального показателя в диапазон суммы баллов, определенной для данного класса особых условий военной службы указанных в табл. 1.

В заключение статьи отметим следующие моменты. Новое вооружение, новые способы действий подразделений и воинских частей создают и новые условия повседневной деятель-

ности войск, в том числе и те, которые получили название «особые». Служба в таких необычных условиях должна быть компенсирована военнослужащим ежемесячной надбавкой к денежному довольствию. Изложенная выше методика позволит применять ее для практической процедуры оценивания ОУВС с достаточной степенью достоверности.

Вопросы справедливой оплаты за службу в таких условиях являются серьезной задачей, стоящей перед органами военного управления. Эффективная, настойчивая и последовательная деятельность командиров и начальников по предоставлению своевременных, объективных предложений по внесению изменений в перечни воинских должностей, связанных с ОУВС, является важным фактором обеспечения высокого уровня морально-психологического состояния воинских коллективов. Без решения этих вопросов государство не вправе рассчитывать на повышение престижа военной службы.

Список используемых источников

1. Выступление на расширенной Коллегии Минобороны России 21 декабря 2021 года Президента Российской Федерации – Верховного Главнокомандующего Вооруженными Силами Российской Федерации Владимира Путина // Армейский сборник. – 2022. – № 1.
2. *Кудаев А. В.* Социальная защита военнослужащих в условиях социально-экономического развития России: автореф. дис. ... канд. социол. наук. – Саратов, 2017. – 18 с.
3. Физиология военного труда / В. Н. Сысоев [и др.]. – СПб.: изд-во «Любавич», 2011. – 455 с.
4. *Карташов И. Г.* Условия жизни военнослужащих по контракту как фактор их здоровья // Социологические исследования. – 2008. – № 2. – С. 118–122.

А. И. Авсеенко,
кандидат технических наук, доцент;
Д. Н. Прищепа,
кандидат технических наук;
А. М. Сычева,
доктор технических наук, доцент;
М. А. Янчук

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ БЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ СПЕЦИАЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ СТАРТОВЫХ КОМПЛЕКСОВ

В работе показано, что повышение технического состояния бетонных сооружений стартовых комплексов возможно путем их обработки специальными пропиточными составами, что ведет к сокращению времени ремонтно-восстановительных работ и межпусковых сроков. Поглощение различных пропиточных составов на основе золей возможно за счет самопроизвольного подъема жидкостей по капиллярно-пористой структуре бетона. Рассмотрены методы насыщения бетона пропиточными составами (золями) во всем объеме для увеличения его прочности. Предложены методы интенсификации пропитки за счет воздействия на коллоидные растворы электрических полей, энергии ультразвука и других видов воздействий. Разработан алгоритм применения интенсификации пропитки строительных конструкций стартовых комплексов.

Ключевые слова: бетон, пропитка, эксперимент, метод, электрический ток

ВВЕДЕНИЕ

Бетонные конструкции специальных сооружений, например стартовых комплексов, эксплуатируются под открытым небом, поэтому подвержены агрессивному воздействию внешней среды (перепады температур, содержащиеся в воздухе газы, атмосферные осадки, сильные ветра, ультрафиолетовые лучи и т. д.), плюс экстремальные нагрузки от газодинамической струи стартующей ракеты. Замена элементов, которые потеряли свои прочностные характеристики, зачастую невозможна, поэтому разработка способов, позволяющих восстанавливать прочность конструкций либо существенно ускорить ремонтно-восстановительные работы без демонтажа, актуальна.

В отечественной практике применяются различные методики дополнительной обработки строительных изделий, которые продлевают их срок службы, но для элементов стартовых комплексов до настоящего времени такие технологии не применялись, ввиду их недостаточной разработанности. Целесообразно сделать анализ существующих способов и на их основе разработать новую методику, позволяющую восстанавливать прочность строительных конструкций стартовых сооружений.

На сегодняшний день известно, что пропитку бетонных и других каменных пористых поверхностей производят различными физико-механическими способами. Пропиточные составы могут быть как органической, так и неорганической природы.

Бетон представляет собой капиллярно-пористое тело, которое способно самопроизвольно впитывать пропиточный состав. Для ускорения этого процесса используют различные операции: обработку давлением, вакуумирование, повышение температуры, ультразвуковое воздействие и др.

Целью пропитки может быть гидрофобизация и коррозионная защита бетона, повышение физико-механических характеристик поверхности пористых строительных материалов, таких как камень и бетон, защита зданий и памятников на бетонной основе от деградации в результате выветривания и др.

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ СПОСОБОВ ПРОПИТКИ БЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

Используя открытые источники, можно провести анализ существующих способов пропитки бетонных поверхностей.

Например, в работе [1] приводятся результаты сравнения флуоресцентной эпоксидной пропитки цементных материалов под высоким давлением (>20 бар) с более традиционным методом вакуумной пропитки. Глубина проникновения флуоресцентной эпоксидной смолы исследуется в ультрафиолетовом свете и коррелируется с величиной давления. Результаты ясно показывают, что пропитка под высоким давлением является более эффективным и быстрым методом встраивания эпоксидной смолы в цементирующие материалы.

В статье [2] приводятся сведения о разработанной технологии увеличения прочности и водостойкости изделий из бетона. Технология реализуется за счет заполнения порового пространства бетона жидким стеклом путем внутреннего вакуумирования.

Бетонополимер, полученный на основе портландцементного бетона путем его пропитки вакуумной системой и системой ультразвуковых колебаний, обладает отличными механическими и физико-химическими свойствами [3–5]. Оптимальные условия полимеризации были получены при частоте СВЧ 400 Вт и 2450 МГц при атмосферном давлении.

В работе рассмотрено повышение качества гидрофобной защиты строительных материалов путем пропитки водорастворимыми кремнийорганическими жидкостями объема строительного материала с применением электрохимических методов [6].

В статье [7] описывается способ, позволяющий осуществлять пропитку железобетонных изделий полимерами винилового ряда с целью повышения их коррозионной стойкости. На изделия воздействуют переменным током напряжением 30–40 В при плотности тока 10–30 А/м² в течение 10–20 мин, причем перед пропитыванием изделия увлажняют водой.

Низкоинтенсивные ультразвуковые волны (20 кГц, 0,19–0,57 Вт/см²) были применены для повышения эффективности проникания метилметакрилата в затвердевший бетон без предварительной сушки для последующей полимеризации. Проведено систематическое исследование связи между глубиной пропитки и следующими параметрами: плотностью энергии ультразвука, временем пропитки, расстоянием между ультразвуковым рогом и поверхностью образца и приложенным градиентом постоянного напряжения. В работе представлены результаты экспериментов и предложен механизм усиления ультразвука.

В работе [8] изучали влияния концентрации полимера и времени пропитки, а также времени отверждения цементных паст на физико-механические свойства затвердевших портландцементно-метилметакрилатных композитов. Результаты показали, что объем поглощенного полимера уменьшается с течением времени гидратации, что связано с изменением пористой структуры.

Вопрос защиты строительных материалов и конструкций от воздействия влаги решается за счет их пропитки гидрофобной жидкостью. Дополнительно к обрабатываемой площади прикладывают магнитное поле, направление силовых линий которого перпендикулярно направлению миграционного потока частиц. Этим обеспечивается равномерность и глубина пропитки гидрофобной жидкостью строительного материала или конструкции [9].

В [10] представлены результаты экспериментальных испытаний высокопрочного бетона на прочность после его пропитки золей гидроксида железа в постоянном магнитном поле. Увеличение прочности бетона класса В30 при такой технологии составляет до 1,8 раза.

Авторами [11, 12] рассмотрен вопрос самопроизвольной пропитки золями SiO₂ и Fe(OH)₃ поверхности бетона с целью увеличения его прочности, твердости и других физико-механических характеристик. Золи представляют собой коллоидные (в данном случае водные) растворы, содержащие частицы наноразмера. Показано, что толщина слоя пропитки составляет около 1 см. Прочность и твердость бетонных образцов повышается до 50 %.

Повышение физико-механических характеристик бетона происходит за счет взаимодействия частиц золь с компонентами цементного камня с образованием гидросиликатов каль-

ция. Предполагается, что новообразования занимают поровое пространство и процесс капиллярного поглощения замедляется.

Все проанализированные способы имеют существенный недостаток, связанный с недостаточной глубиной пропитки бетонной поверхности.

С целью получения высокопрочных бетонных изделий и использования достигнутых результатов в военном строительстве авторами поставлена задача оценить возможность увеличения толщины слоя пропитки.

СПОСОБЫ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПРОПИТКУ БЕТОНА

Способность переноса жидкости в пористой бетонной среде играет важную роль не только с точки зрения его разрушения (в случае переноса влаги), но и придания ему особых свойств: коррозионной устойчивости, низкого водопоглощения, упрочнения и т. д. Существуют две различные модели, используемые для изучения влагопереноса в пористых материалах. Это диффузионная модель, главную роль в которой играет поперечное сечение материала. На начальном этапе набора прочности бетоном, модель определяется диффузией воды. Другая модель описывает капиллярно-транспортный механизм. Он моделирует проникновение и перемещение жидкости по капиллярам в поровом пространстве [13].

Внешнее электрическое поле (ЭП) оказывает влияние на молекулярные взаимодействия, имеющие электромагнитную природу. Во влажных пористых телах это влияние распространяется и на капиллярные явления. Капиллярные явления – это явления, вызванные влиянием поверхностного натяжения на равновесие (статика) и движение (кинетика) свободных поверхностей жидкостей, а также границ жидкостей с твердыми телами или другими несмешивающимися жидкостями [8].

Простейшая теоретическая модель, которая связывает высоту поднятия жидкости по капилляру H_k , с радиусом пор r в бетонах для двухкомпонентной системы может быть определена по формуле Жюрене:

$$H_k = 2\alpha \cdot \cos\Theta / (r \cdot g \cdot \rho), \quad (1)$$

где α – поверхностное натяжение жидкости (для воды $\alpha = 72,8$ дин/см при $t = 20^\circ\text{C}$);

Θ – краевой угол смачивания;

r – радиус капилляра;

g – ускорение силы тяжести;

ρ – плотность воды [8].

Кроме этого, исследователями показано, что на высоту подъема жидкости в капиллярно пористом материале влияет время t [8].

Основная идея работы заключается в том, что увеличение глубины пропитки в бетон гидрозолями SiO_2 и $\text{Fe}(\text{OH})_3$ возможно за счет использования: электрической энергии, энергии ультразвука, физико-химических методов.

1. Использование электрической энергии.

Поскольку золи имеют поверхностный заряд, то при пропускании через них электрического тока, заряженные частицы могут в большей степени вовлекаться в бетон и толщина пропитанного слоя и скорость пропитки могут увеличиваться.

Кроме этого, вероятно, будет играть роль химическая природа частиц. Железо является электропроводящим металлом, поэтому предполагается, что золь $\text{Fe}(\text{OH})_3$ под действием электрического тока будет эффективнее проникать в тело бетона. Исходя из этого предположения, при проведении эксперимента планируется помимо золь SiO_2 и $\text{Fe}(\text{OH})_3$ использовать золь $\text{Al}(\text{OH})_3$, а также смеси на основе этих золь.

Величины α , ρ , r в формуле (1) в ходе эксперимента будут меняться мало, измерение величины Θ в ходе эксперимента затруднительно, а g – величина постоянная.

Напряженность электрического поля (E , В/см) равна:

$$E = F/q;$$

$$F = E \cdot q,$$

где q – заряд золь, величина постоянная;

F – сила, действующая на заряженную частицу.

С учетом вышесказанного важное значение будут иметь напряженность электрического поля, полярность (P^\pm), форма электродов и время пропитки:

$$H_{кз} = f(E, P^\pm, t). \quad (2)$$

На рис.1 приведена схема обработки системы «бетон-пропиточный состав» электрическим током. Установка состоит из бетонного образца, ванны с золом, высоковольтного аппарата с возможностью изменения выпрямленного напряжения на электродах в диапазоне от 0 до 70 кВ.

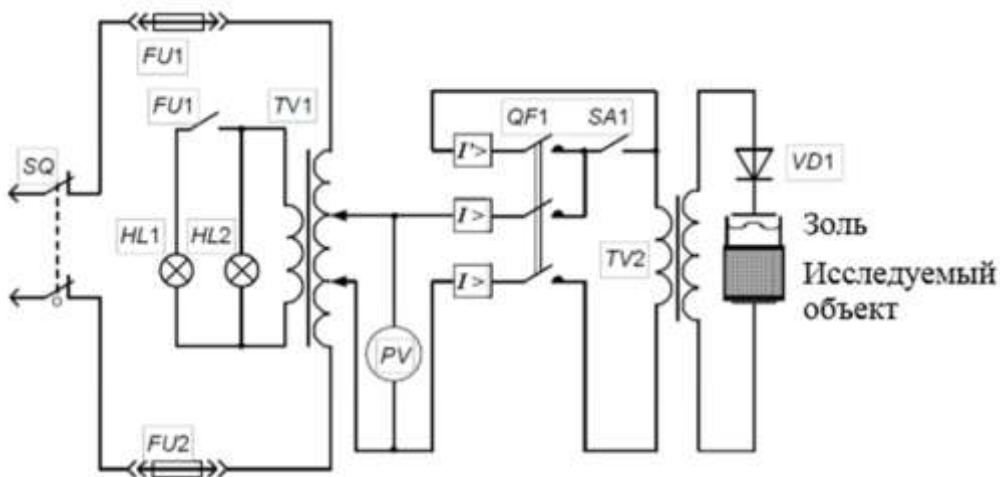


Рис. 1. Установка обработки системы «бетон-пропиточный состав» электрическим током

При проведении эксперимента изготавливались образцы тяжелого бетона класса В30 размером 100x100x100 мм. В процессе их производства использовался портландцемент ЦЕМ 42,5, гранитный щебень 5–10 мм и карьерный песок с модулем крупности $M_{кр} = 2,26$. Состав бетона показан в табл. 1.

Таблица 1
Расход компонентов бетона, кг/м³

Цемент	Песок	Щебень	Вода
370	802	1063	155

Возраст образцов, в котором начинается пропитка – 3 суток нормального твердения, поскольку в этом возрасте хорошо развита пористая структура бетона. Распалубочная прочность достигалась на третьи сутки нормального твердения.

В табл. 2 приведены пропиточные составы, которые использовались при проведении эксперимента.

Таблица 2

**Вид и концентрация пропиточных составов
на основе различных золей**

Пропиточный состав	Концентрация дисперсной фазы
Золя SiO ₂	3%
Золя Fe(OH) ₃	3%
Золя Al(OH) ₃	3%
Золя SiO ₂ :золя Fe(OH) ₃ (1:1)	3%

При проведении эксперимента создавалась различная напряженность электрического поля. При малых напряжениях, скорее всего, реализовалась схема электрофореза – явления перемещения частиц дисперсной фазы (коллоидных или белковых растворов) в жидкой или газообразной среде под действием внешнего электрического поля. При больших напряжениях увеличивалась плотность тока, что приводило к уменьшению коэффициента поверхностного натяжения растворов. Из этого следует, что возможно изменение высоты подъема воды в макрокапиллярах при воздействии внешних электрических полей.

Время обработки системы «бетон-пропиточный раствор» составляет от 1 до 7 суток.

В результате проведения эксперимента в соответствии со схемой, изображенной на рис.1, при использовании напряженности электрического поля от 200 В/см было установлено, что максимальный эффект достигается при обработке в течение 2 суток и напряжении 2 кВ.

Количество пропиточного состава (золя SiO₂), впитавшегося в тело бетона составило ~ 20% от самопроизвольно поглощенного количества при полном погружении образцов бетона в раствор. Это, вероятно, связано с тем, что при воздействии на бетонную смесь электростатического напряжения определенной полярности интенсифицируются процессы твердения цемента. Происходит ориентация молекул воды, поляризация двойного электрического слоя дисперсных частиц, электризация поверхности заполнителей, цементных зерен и новообразований [10].

По данным ртутной порометрии активированные электрическим полем образцы цементного камня имеют примерно в 2 раза меньший объем пор и их средний размер. Уменьшение объема пор может способствовать замедлению процессов капиллярного подсоса, что и наблюдалось при проведении эксперимента.

2. Использование ультразвуковой энергии.

Поскольку ультразвуковые воздействия усиливают пропитку бетона достаточно вязкими веществами, то такая обработка может способствовать и более глубокой миграции золей в тело бетона.

Известны экспериментальные данные о влиянии колебаний на изменение высоты подъема жидкостей, в том числе и воды, в капиллярных трубках с различным внутренним диаметром. Этот эффект может быть связан с кавитационной гипотезой. Обнаружено, что при относительных колебаниях жидкости и капилляра возможен ее дополнительный подъем. Высокоскоростная съемка показала, что подъем жидкости связан с локализацией кавитационного облака вблизи входа в капилляр. Это привело авторов к выводу, что дополнительный подъем происходит вследствие захлопывания кавитационных пузырьков во входном сечении капилляра.

Исходя из данных литературного обзора, можно сказать, что для увеличения глубины пропитки важным будет частота ультразвуковой волны λ и время воздействия t :

$$H_{ky} = f(\lambda, t). \quad (3)$$

Схема установки для обработки бетонных образцов ультразвуком показана на рис. 2.

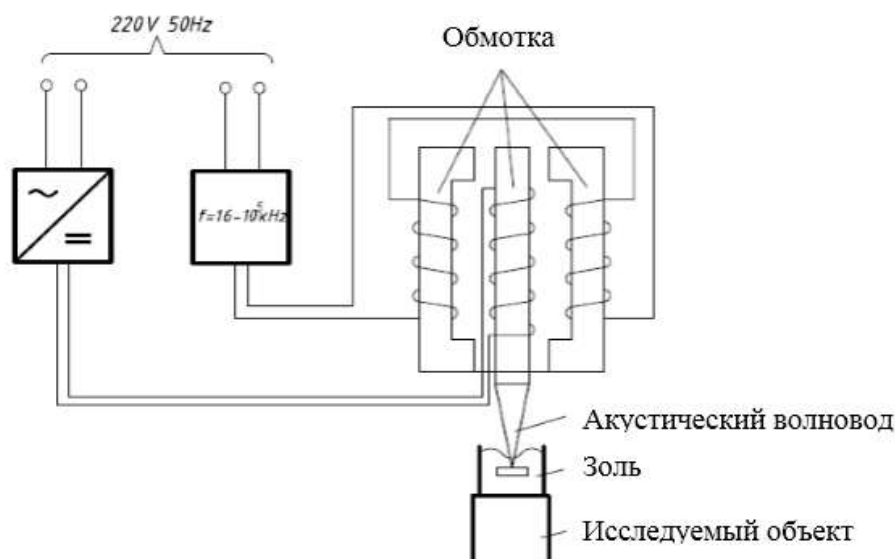


Рис. 2. Установка обработки системы «бетон-пропиточный состав» ультразвуком

Установка состоит из электрического источника ультразвуковых колебаний, концентратора, бетонного образца и ванны с золом.

Электрический источник ультразвуковых колебаний преобразует электрическую энергию в механические колебания частотой 16–10⁵ кГц, а концентратор вводит ультразвуковые колебания в зону обрабатываемого объекта.

3. Физико-химический способ.

Метод увеличения толщины пропитки основан на подборе таких добавок для золей, которые смогли бы увеличить его самопроизвольное проникание в толщу бетона.

Известно, что для увеличения проникающей способности пропиточного состава нужно снизить его поверхностное натяжение и вязкость η и увеличить смачиваемость Θ . Этого можно добиться, если добавить к золям SiO_2 и $\text{Fe}(\text{OH})_3$ пенетранты – вещества, обладающие повышенной проникающей способностью, которые используются в капиллярной дефектоскопии. Пенетранты должны увеличить интенсивность проникания растворов золей в тело бетона за счет высокой проникающей способности.

Вместе с тем известно, что поверхностно активные вещества, входящие в состав пенетрантов, замедляют гидратацию цемента. Этот эффект будет препятствовать заполнению объема пор бетона новообразованиями и может увеличить интенсивность пропитки.

С учетом вышесказанного можно предположить, что высота поднятия пропиточного состава в бетоне будет зависеть от следующих факторов:

$$H_{\text{кф.х.}} = f(\alpha, \eta, \Theta, t). \quad (4)$$

АЛГОРИТМ МЕРОПРИЯТИЙ УЛУЧШЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ СТАРТОВЫХ КОМПЛЕКСОВ ПРИ ИХ ОБСЛУЖИВАНИИ

По итогам анализа и проведения практических экспериментов с образцами бетонных конструкций можно предложить алгоритм интенсификации пропитки бетонных конструкций (рис. 3). Данный способ применим при проведении технического обслуживания и ремонтно-восстановительных работ стартовых сооружений.

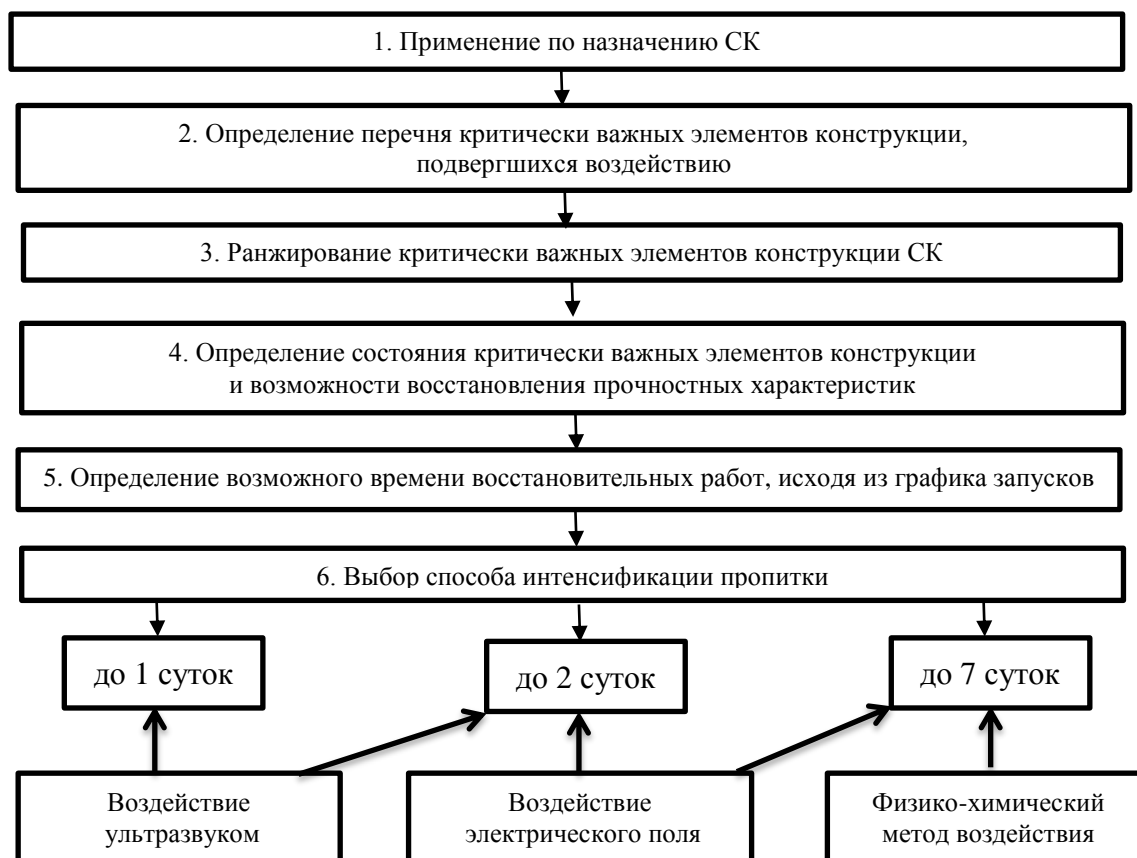


Рис. 3. Алгоритм изменения технического состояния специальных сооружений стартовых комплексов при их обслуживании

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ существующих методов интенсификации пропитки бетонных элементов строительных конструкций показал, что электрофизические и физико-химические методы для увеличения интенсивности пропитки золями SiO_2 , $\text{Fe}(\text{OH})_3$ и $\text{Al}(\text{OH})_3$ на сегодняшний день до конца не исследованы, и технические и технологические решения их применения в практике эксплуатации объектов специального назначения не применяются.

В ходе проведения экспериментальных исследований авторы пришли к выводу, что процесс воздействия электрического поля большой напряженности более 2 кВ, не вызывал увеличения интенсивности пропитки золя SiO_2 в бетон.

По результатам анализа существующих способов интенсификации пропитки бетонных элементов предложено теоретическое обоснование увеличения объема пропитки с использованием электрофизических и физико-химических методов воздействия на систему «бетон-пропиточный раствор».

По результатам проведенной работы предложен алгоритм пропитки бетонных конструкций специальных сооружений с использованием электрофизических воздействий.

Список используемых источников

1. Chen J. J., Zampini D., Walliser A. High-pressure epoxy-impregnated cementitious materials for microstructure characterization // Cement and Concrete Research. – Vol. 32, № 1. – 2002. – P. 1–7.

2. *Кротова О. М., Токарев М. Н.* Повышение плотности и прочности бетона и железобетона пропиткой жидким стеклом путем внутреннего вакуумирования // Технологии бетонов. – 2011. – № 1-2 (54-55). – С. 24–26.
3. Physical properties of polymer impregnated concrete prepared using microwave radiation / D. H. Ku [et al.] // Journal of the Korean Industrial and Engineering Chemistry. – 2008. – Vol. 19(3). – P. 345–350.
4. *Amianti M., Botaro V. R.* Recycling of EPS: A new methodology for production of concrete impregnated with polystyrene (CIP) // Cement and Concrete Composites. – 2008. – Vol. 30. – P. 23–28.
5. Пат. RU 2268269 С2. Полиизоцианатная композиция для пропитки бетона и способ пропитки бетона / Веселовский Р. А. – 2004104932/04; заявл. 17.02.2004; опубл. 20.01.2006, Бюл. № 02. – 7 с.
6. Технология гидрофобной защиты капиллярно-пористых строительных материалов и изделий / Н. Н. Дебелова [и др.] // Вестник ТГАСУ. – 2009. – № 2. – С. 121–126.
7. The effects of deicer salts on the pressure impregnation of bridge deck type concrete with methyl methacrylate / R. E. Weyers [et al.] // Cement and Concrete Research. – 1976. – Vol. 6, is. 2. – P. 253–263. – URL: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(76\)90123-X](https://doi.org/10.1016/0008-8846(76)90123-X) (дата обращения: 29.01.2022).
8. Модификация бетонов с использованием акустического и электромагнитного полей / Б. Ц. Дамдинжапов [и др.] // Технологии бетонов. – 2011. – № 7-8 (60-61). – С. 65–66.
9. *S. Chandra, M. Rodhe.* Asphalt impregnation of high strength mortar and concrete using temperature difference // Cement and Concrete Research. – 1985. – Vol. 15, № 3. – P. 495–500. – URL: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(85\)90123-1](https://doi.org/10.1016/0008-8846(85)90123-1) (дата обращения: 5.02.2022).
10. Пат. RU 2231603 С1. Способ защиты строительных материалов и конструкций от воздействия влаги / Дебелова Н. Н., Горленко Н. П., Подшивалов И. И., Саркисов Ю. С. – 2002130561/03; заявл. 14.11.2002; опубл. 27.06.2004, Бюл. № 11. – 5 с.
11. *Богомолов С. И., Соломахин А. С., Старчуков Д. С.* Упрочнение бетона с использованием золя гидроксида железа (III) в постоянном магнитном поле // Вопросы оборонной техники. – 2020. – Вып. 7-8 (145-146). – С. 110–113.
12. Method of surface hardening of concrete for special purpose structures / A. M. Sycheva [et al.]. – SPb.: MCA named after A. F. Mozhaisky, 2018. – 74 p.
13. *Матвиенко В. А.* Электрическая активизация в технологии бетона и изделий: автореф. дис. ... докт. техн. наук. – Харьков, 1993. – 36 с.

Д. А. Волоткович*,
кандидат технических наук, доцент;
И. В. Кучеренко*,
кандидат технических наук, доцент;
А. В. Мищенко*,
доктор технических наук, доцент
*НВВКУ, г. Новосибирск.

ОПТИМИЗАЦИЯ МАЧТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ АНТЕННЫХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КРИТЕРИЯ

Представлен метод энергетической оптимизации параметров мачтовой системы с предварительно напряженными оттяжками. Запись основных соотношений, в том числе физических зависимостей для слоисто-неоднородного ствола мачты, в относительных безразмерных величинах позволила выполнить постановку оптимизационной задачи для искомых параметров конфигурации системы вне зависимости от абсолютных значений генеральных размеров, нагрузок и жесткостей системы. В качестве критерия оптимальности принят критерий минимума потенциальной энергии деформации системы. Варьируемыми параметрами являются расстояния между точками крепления ярусов оттяжек. Выполнен численный расчет двухъярусной системы с нахождением оптимальных значений координат точек крепления предварительно напряженных оттяжек.

Ключевые слова: неоднородная мачта, ярусные оттяжки, оптимальное проектирование, энергетический критерий.

ВВЕДЕНИЕ

Вантово-мачтовые сооружения являются конструктивной основой многих вариантов построения систем приемо-передающих средств связи гражданского и военного назначения [1, 2]. Они сочетают в себе широкую функциональность в плане обеспечения основного предназначения средств связи, а также рациональность конструктивного исполнения. Последнее обусловлено спецификой напряженного состояния, возникающего в вантовых элементах, их высокой прочностью, способностью эффективно выполнять роль стабилизирующих элементов антенного ствола и обеспечивать жесткость системы в целом.

Ствол мачты обычно выполняется из однородного материала – стали или алюминия и имеет исполнение в виде сквозной фермы или сплошной тонкостенной трубы. В настоящее время широкое распространение в технике получили технологии использования дискретно и дисперсно-неоднородных материалов и конструкций [3]. Их применение дает возможность реализовать повышенную прочность и жесткость конструкции в сочетании со снижением ее массы и стоимости [4, 5]. Применение композитов в антенных устройствах дополнительно повышает их помехоустойчивость и надежность при приеме и передаче радиосигнала.

Цель расчета состоит в определении оптимальных общих параметров расчетной схемы мачтовой системы для последующего ее использования на этапе детального проектирования по критериям локальной прочности, общей жесткости и работоспособности узловых соединений.

Одним из ключевых аспектов метода оптимизации является выбор критерия оптимальности, положенного в основу формирования целевой функции. Наряду с прямыми критериями качества проекта конструкции, отражающими требования снижения веса, стоимости конструкции, повышения ее жесткости, несущей способности, длительности эксплуатации и др., используются и косвенные критерии качества, напрямую не содержащие эксплуатационные требования, но эффективно на них влияющие. Наиболее распространенным из них является

энергетический критерий [5–8], согласно которому считается, что наилучший (оптимальный) набор варьируемых параметров системы доставляет величине потенциальной энергии ее деформации минимальное значение:

$$W \rightarrow \min. \quad (1)$$

Данный критерий базируется на фундаментальном физическом понятии и отражает способность механической системы сопротивляться внешним воздействиям при минимуме энергетических затрат. Поскольку потенциальная энергия деформации системы является обобщенной величиной, зависящей от внутренних усилий, деформаций и объема материала, то связь критерия (1) с частными критериями, минимизирующими величины напряжений, деформаций и массы (объема) материала по отдельности, является очевидной.

ПОСТАНОВКА И МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

1. Мачтовая конструкция состоит из прямолинейного вертикального ствола, имеющего радиально-слоистую структуру, и системы предварительно-напряженных вантовых оттяжек (рис. 1). В системе координат xuz ось мачты совместим с осью x , а плоскость uz – с основанием системы. В каждом из m ярусов имеется произвольное число оттяжек n , равномерно распределенных в плоскости uz (рис. 1, в). Направление ветровой нагрузки q_w совпадает с осью y .

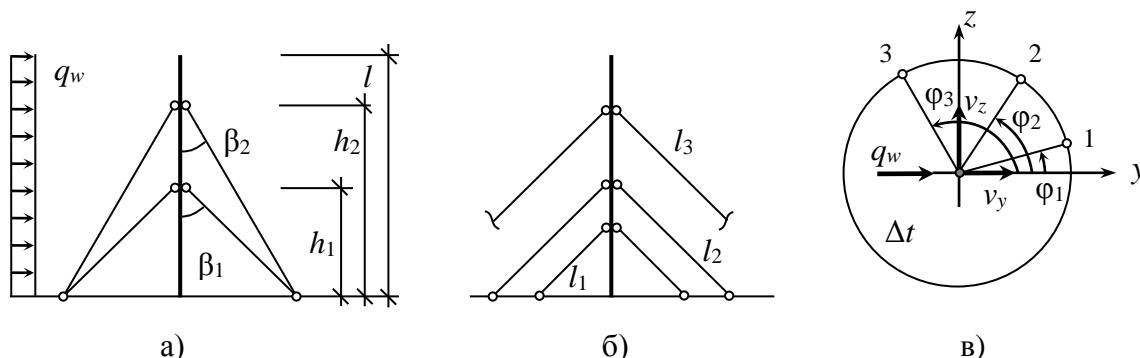


Рис. 1. Расчетная схема мачты:

a – общая схема; *б* – вариант конфигурации оттяжек;
в – схема расположения оттяжек в горизонтальной плоскости uz

Поперечное сечение мачты содержит s квазиоднородных слоев, разделенных концентрическими круговыми границами с радиусами ρ_k ($k = 1, \dots, s+1$). Обозначим через $\delta_k = \rho_{k+1} - \rho_k$ толщину k -го слоя, $\rho_{k,cp} = (\rho_{k+1} + \rho_k) / 2$ – радиус срединной поверхности слоя, E_k , α_k – модуль упругости и коэффициент теплового расширения материала k -го слоя.

Осевая и изгибные жесткости поперечного сечения ствола мачты заданы следующим выражением [12]:

$$[D_A, D_z, D_y] = \sum_{k=1}^s E_k \int_{A_k} [1, y^2, z^2] dA_k, \quad (2)$$

где A_k – площадь поперечного (нормального к оси x) сечения k -го слоя.

Кроме жесткостей (2) в неоднородном стержне произвольной структуры характерно наличие группы жесткостей:

$$[D_y, D_z, D_{yz}] = \sum_{k=1}^s E_k \int_{A_k} [z, y, zy] dA_k, \quad (3)$$

обуславливающих взаимное влияние видов деформации стержня друг на друга: изгиб-растяжение, изгиб-кручение. В стержнях полярно-симметричной структуры величины (3) равны нулю, а из (2) имеем:

$$D_A = 2\pi \sum_{k=1}^s E_k \delta_k \rho_{k,cp};$$

$$D_{Iy} = D_{Iz} = D_I = \frac{\pi}{2} \sum_{k=1}^s E_k \delta_k \rho_{k,cp} (\rho_{k+1}^2 + \rho_k^2).$$

2. Рассмотрим задачу оптимизации основных параметров P конфигурации мачтовой системы при ее линейном деформировании. Энергетический критерий (1) при термосиловом воздействии запишем в виде

$$W(P) = \frac{1}{2} \int_l S^T \Delta dx + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n T_{ij} \Delta_{ij} \rightarrow \min. \quad (4)$$

Здесь первое слагаемое отражает энергию деформации в неоднородном стволе мачты, а второе – в системе однородных оттяжек. В формуле (4) введены следующие обозначения:

T_{ij}, Δ_{ij} – усилие и удлинение j -й оттяжки, расположенной в i -м ярусе;

S^T – вектор функций внутренних усилий в стволе:

$$S^T = [M_y \quad M_z \quad N \quad Q_z \quad Q_y](P, x); \quad (5)$$

Δ^T – вектор функций обобщенных деформаций:

$$\Delta^T = [\kappa_y \quad \kappa_z \quad \varepsilon_0 \quad \gamma_{0z} \quad \gamma_{0y}](P, x), \quad (6)$$

где κ_y, κ_z – кривизны оси мачты;

ε_0 – осевая деформация;

γ_{0y}, γ_{0z} – осредненные поперечные сдвиги.

Набор варьируемых параметров

$$P = [p_1, p_2, \dots, p_c] \quad (7)$$

может содержать координаты h_i точек крепления ярусов оттяжек (см. рис. 1), углы, образованные оттяжками с осью мачты β_i , количество ярусов m , количество оттяжек в ярусах n и ряд других [5, 7, 8].

Достоинством формулировки критерия в форме (4) является ее универсальность и единство по отношению к видам учитываемых деформаций элементов системы. В случае пренебрежения в расчете энергией деформации сдвига следует исключить из векторов (5) и (6) четвертую и пятую компоненты $Q_z, Q_y, \gamma_{0z}, \gamma_{0y}$, а при не учете энергии продольных деформаций – убрать третьи компоненты N и ε_0 . Эта же формулировка (4) пригодна и для рассмотрения плоских задач, путем исключения второй и пятой компонент векторов (5) и (6).

Для удобства последующих вычислений и анализа результатов, а также с целью исключения влияния неварьируемых параметров на результат, перейдем к безразмерным относительным величинам перемещений v_x, v_y, v_z , углов поворота θ_y, θ_z , изгибающих моментов M_y, M_z и кривизн κ_y, κ_z оси мачты, продольных N и поперечных сил Q_y, Q_z в мачте, осевой деформации ε_0 и деформаций сдвига γ_z, γ_y , деформаций ε_{ij} и усилий T_{ij} в оттяжках, координаты x и

расстояния h_i до точки крепления оттяжек i -го яруса. Обозначая их с помощью верхнего начерка над символом исходной размерной величины, введем следующие соотношения:

$$\begin{aligned} [\bar{v}_y, \bar{v}_z] &= \frac{D_l}{q_w l^4} [v_y, v_z], \quad \bar{v}_x = \frac{D_A}{q_w l^2} v_x, \quad [\bar{\theta}_y, \bar{\theta}_z] = \frac{D_l}{q_w l^3} [\theta_y, \theta_z], \\ [\bar{\kappa}_y, \bar{\kappa}_z] &= \frac{D_l}{q_w l^2} [\kappa_y, \kappa_z], \quad \bar{\varepsilon} = \frac{D_A}{q_w l} \varepsilon_0, \quad \bar{\varepsilon}_{ij} = \frac{D_{ij}}{q_w l} \varepsilon_{ij}, \quad [\bar{\gamma}_y, \bar{\gamma}_z] = \frac{D_Q}{q_w l} [\gamma_y, \gamma_z], \\ [\bar{M}_y, \bar{M}_z] &= \frac{1}{q_w l^2} [M_y, M_z], \quad [\bar{N}, \bar{Q}_y, \bar{Q}_z, \bar{T}] = \frac{1}{q_w l} [N, Q_y, Q_z, T], \quad [\bar{x}, \bar{r}, \bar{h}_i] = \frac{1}{l} [x, r, h_z]. \end{aligned}$$

3. Запишем основные соотношения для мачтовой системы:

а) физические зависимости для структурно-неоднородного ствола мачты – в форме, приведенной в [12], при наличии однородного теплового поля с заданным однородным изменением температуры Δt и учете нулевого значения жесткостей (3):

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon}_0 &= \bar{N} - \bar{N}_t, \quad \bar{\kappa}_z = \bar{M}_z, \quad \bar{\kappa}_y = \bar{M}_y, \\ \bar{\gamma}_{0z} &= \bar{Q}, \quad \bar{\gamma}_{0y} = \bar{Q}_y, \\ \bar{N}_t &= -\frac{\Delta t}{q_w l} \sum_{k=1}^s E_k \alpha_k A_k; \end{aligned}$$

б) $n \cdot m$ условий термосилового деформирования оттяжек:

$$\bar{\varepsilon}_{ij} = \bar{T}_{ij} - \bar{T}_{ijt}, \quad (i=1, \dots, m, j=1, \dots, n), \quad \bar{T}_{ijt} = -\frac{\Delta t}{q_w l} E_{ij} \alpha_{ij} A;$$

в) дифференциальные зависимости:

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon}_0 &= \frac{d\bar{v}_x(\bar{x})}{d\bar{x}}, \quad \bar{\theta}_z = \frac{d\bar{v}_y(\bar{x})}{d\bar{x}}, \quad \bar{\kappa}_z = \frac{d^2\bar{v}_y(\bar{x})}{d\bar{x}^2}, \quad \bar{Q}_y = \frac{d\bar{M}_z(\bar{x})}{d\bar{x}}, \\ \bar{\theta}_y &= \frac{d\bar{v}_z(\bar{x})}{d\bar{x}}, \quad \bar{\kappa}_y = \frac{d^2\bar{v}_z(\bar{x})}{d\bar{x}^2}, \quad \bar{Q}_z = \frac{d\bar{M}_y(\bar{x})}{d\bar{x}}. \end{aligned}$$

Тогда уравнения продольных и поперечных перемещений мачты, испытывающей воздействие ветровой нагрузки q_w [10], собственного веса q_x и однородного теплового поля, примут вид:

$$\bar{v}_x(x) = \bar{v}_{x0} + (\bar{N}_0 - \bar{N}_t)\bar{x} + \xi_x \frac{\bar{x}^2}{2} + \sum_{i=1}^m \cos \beta_i \sum_{j=1}^n \bar{T}_{ij} (\bar{x} - \bar{h}_i), \quad (8)$$

$$\bar{v}_y(x) = \bar{v}_{y0} + \bar{\theta}_{z0}\bar{x} + \frac{\bar{M}_{z0}\bar{x}^2}{2} + \frac{\bar{Q}_{y0}\bar{x}^3}{6} + \frac{\bar{x}^4}{24} + \frac{1}{6} \sum_{i=1}^m \sin \beta_i \sum_{j=1}^n \bar{T}_{ij} (\bar{x} - \bar{h}_i)^3 \cos \varphi_{ij}, \quad (9)$$

$$\bar{v}_z(x) = \bar{v}_{z0} + \bar{\theta}_{y0}\bar{x} + \frac{\bar{M}_{y0}\bar{x}^2}{2} + \frac{\bar{Q}_{z0}\bar{x}^3}{6} + \frac{1}{6} \sum_{i=1}^m \sin \beta_i \sum_{j=1}^n \bar{T}_{ij} (\bar{x} - \bar{h}_i)^3 \sin \varphi_{ij}, \quad (10)$$

$$\xi_x = \frac{q_x}{q_w},$$

где β_i – угол, образованный оттяжками i -го яруса с осью x (рис. 1);

φ_{ij} – угол между проекцией оттяжки ij на плоскость yz и осью y (рис. 1, в).

При этом величины, имеющие в нижнем индексе «0», являются начальными параметрами. Согласно методу начальных параметров в выражениях (8)–(10) следует удерживать слагаемые, содержащие $(x - h_i) > 0$.

Для замыкания системы (8)–(10) используем:

а) граничные условия: по четыре при изгибе в плоскостях xOy , xOz , два – при осевом деформировании;

б) условия совместности деформаций Δ_{ij} предварительно напряженных оттяжек и перемещений ствола $v_y(h_i)$, $v_z(h_i)$:

$$\Delta_{ij} = \Delta_{ij}^{(0)} - [v_y(h_i) \cos \varphi_{ij} + v_z(h_i) \sin \varphi_{ij}] \sin \beta_i + v_x(h_i) \cos \beta_i, \quad (11)$$

где $\Delta_{ij}^{(0)}$ – деформация контролируемого укорочения оттяжки при ее предварительном напряжении усилием $T_{ij}^{(0)}$. Условия (11) удобнее представить с использованием усилия

$T_{ij}^{(0)} = D_T \frac{\Delta_{ij}^{(0)}}{l_{ij}}$ в безразмерном виде с использованием радиуса жесткости сечения i_D неоднородного стержня:

$$\bar{T}_{ij} = \bar{T}_{ij}^{(0)} - \frac{\xi_T}{2\bar{i}_D^2 \bar{h}_i} [\bar{v}_y(\bar{h}_i) \cos \varphi_{ij} + \bar{v}_z(\bar{h}_i) \sin \varphi_{ij}] \sin 2\beta_i + \frac{\xi_T}{2\bar{i}_D^2 \bar{h}_i} \bar{v}_x \cos \beta_i; \quad (12)$$

$$\xi_T = \frac{D_T}{D_A}, \quad i_D = \sqrt{\frac{D_I}{D_A}}, \quad \bar{i}_D = \frac{i_D}{l}.$$

4. Решение оптимизационной задачи построено по алгоритму (рис. 2), основанному на раздельном изменении варьируемых параметров P и параметров состояния S , Δ . После задания начальных значений параметров P , выполняется шаг прямого расчета системы с выявлением векторов S (5), Δ (6) при фиксации параметров P .

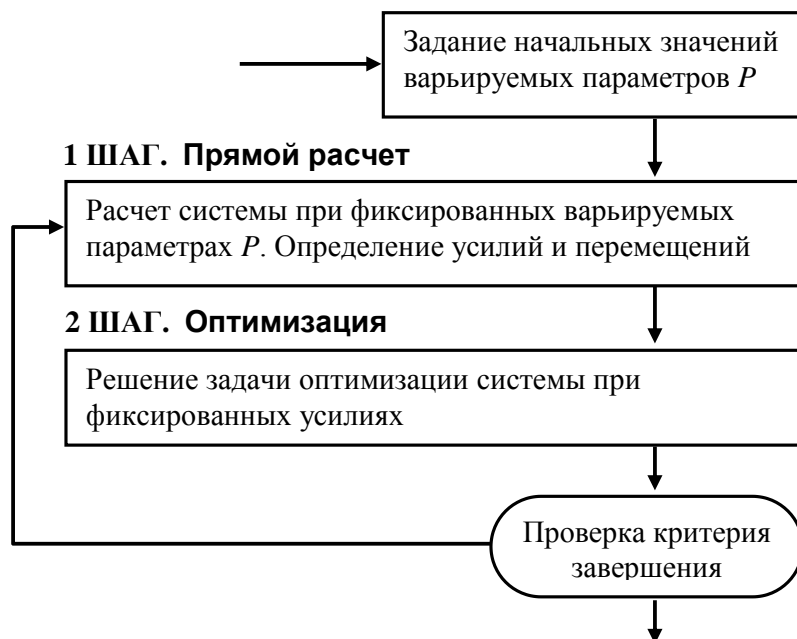


Рис. 2. Алгоритм оптимизации системы

Далее, согласно (4), находится минимум функции потенциальной энергии системы путем варьирования параметров P при полученных на предыдущем шаге усилиях S и деформациях Δ . После проверки достижения заданной точности вычисления величин P , S , Δ принимается решение об окончании расчета или выполнении следующих уточняющих шагов.

Вторым шагом оптимизационного расчета является детальное проектирование по критериям локальной прочности, общей жесткости и другим с использованием найденных безразмерных величин P , S , Δ . При этом запись расчетных критериев необходимо выполнять для соответствующих размерных величин.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

В качестве примера рассмотрим расчет мачты, имеющей по три оттяжки в каждом из двух ярусов согласно рис. 1,а. Для упрощения выкладок и вычислений в выражении (4) энергию деформации мачты будем оценивать по векторам (5), (6) при учете деформаций пространственного изгиба, пренебрегая энергией продольной и сдвиговой деформации. Примем следующие параметры конфигурации расчетной схемы:

$$n = 3, \quad m = 3, \quad \varphi_{11} = \varphi_{21} = 30^\circ, \quad \varphi_{12} = \varphi_{22} = 150^\circ, \quad \varphi_{13} = \varphi_{23} = 270^\circ, \\ \bar{r} = 0,3, \quad \bar{i}_D = 0,0015, \quad \xi_r = 0,025, \quad \bar{T}_0 = 0,8, \quad \Delta t = 0.$$

В качестве варьируемых параметров (7) примем $p_1 = \bar{h}_1 \geq 0$, $p_2 = \bar{h}_2 - \bar{h}_1 \geq 0$ – безразмерные расстояния между точками крепления оттяжек к стволу, начиная от начала мачты ($\bar{x} = 0$). Очевидно, что для них следует потребовать выполнение условия $p_1 + p_2 \leq 1$.

Для принятой расчетной схемы может быть выполнено аналитическое решение задачи с использованием программы символьной математики *Maple*.

Для выявления функций (9) и (10) сформируем систему граничных условий. Принимая шарнирное закрепление ствола мачты, имеем $\bar{v}_{y0} = \bar{v}_{z0} = \bar{M}_{z0} = \bar{M}_{y0} = 0$. Тогда для нахождения оставшихся 10 функциональных неизвестных

$$[\bar{\theta}_{z0} \bar{\theta}_{y0} \bar{Q}_{y0} \bar{Q}_{z0} \bar{T}_{11} \bar{T}_{12} \bar{T}_{13} \bar{T}_{21} \bar{T}_{22} \bar{T}_{23}] (p_1, p_2) \quad (13)$$

разрешающую систему уравнений сформируем из четырех граничных условий:

$$\bar{Q}_y(1) = \bar{Q}_z(1) = \bar{M}_z(1) = \bar{M}_y(1) = 0$$

и шести условий совместности (12), записанных без учета перемещений \bar{v}_x .

Определив неизвестные (13) и функциональные векторы (5), (6), запишем выражение энергии деформации (4) как функции двух параметров p_1 и p_2 . На рис. 2 показана поверхность $W(p_1, p_2)$, построенная при помощи программы *Maple*. В соответствии с критерием (1) данная поверхность имеет точку минимума при $p_{1*} = 0,04$, $p_{2*} = 0,22$, которая отвечает оптимальной конфигурации системы (рис. 3). На рис. 4 показаны сечения поверхности $W(p_1, p_2)$ плоскостями $p_1 = \text{const}$, $p_2 = \text{const}$.

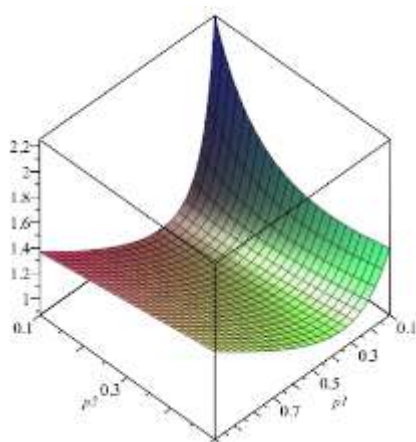


Рис. 3. График зависимости энергии деформации W от варьируемых параметров p_1, p_2

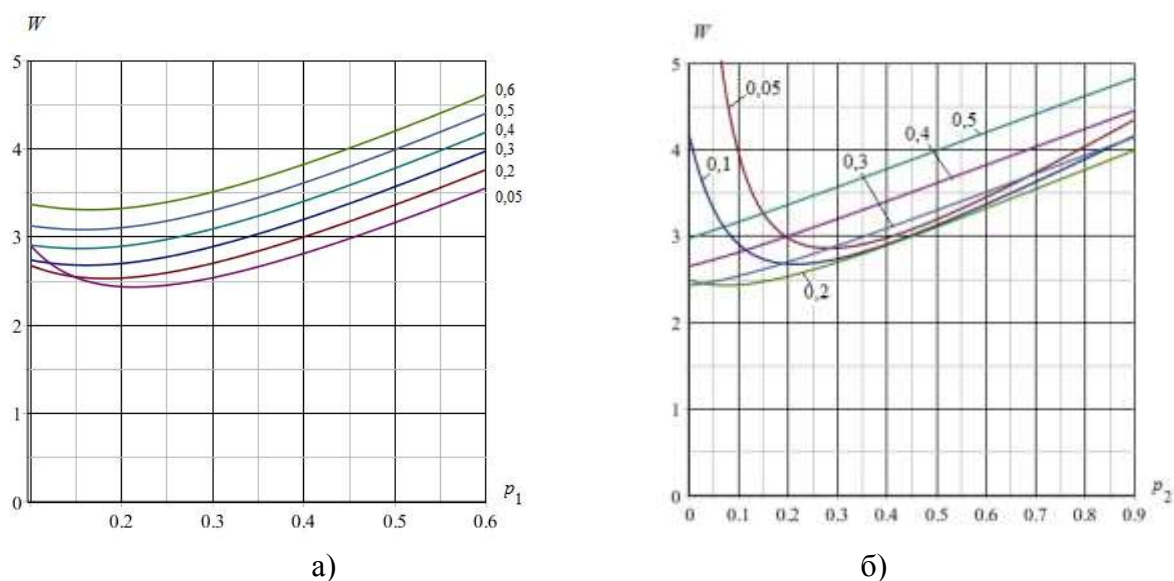


Рис. 4. Сечения энергетической поверхности $W(p_1, p_2)$ плоскостями:
 $a - p_1 = \text{const}$; $b - p_2 = \text{const}$

При оптимальных значениях параметров p_{1*}, p_{2*} усилия в оттяжках составили:

$$\bar{T}_{11} = 0,058, \bar{T}_{12} = 1,542, \bar{T}_{13} = 0,800, \bar{T}_{21} = 0,020, \bar{T}_{22} = 1,580, \bar{T}_{23} = 0,800,$$

а распределение изгибающих моментов \bar{M}_z и поперечных сил \bar{Q}_y , действующих в плоскости действия нагрузки xOy , показаны на графиках рис. 5.

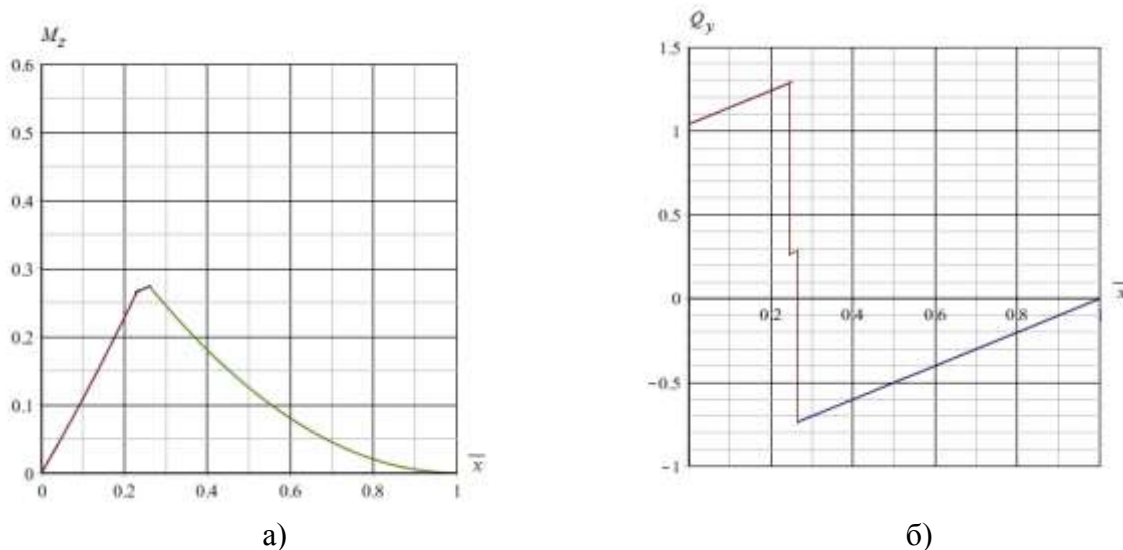


Рис. 5. Графики распределения:
 $a -$ изгибающих моментов $M_z(x)$; $b -$ поперечных сил $Q_y(x)$

Численные результаты полученного решения показали, что расстояние p_{2*} между верхними точками крепления двух ярусов оттяжек является относительно малым, что свидетельствует о приближении данной системы к одноярусной ($p_2 = 0$). Поскольку, согласно схемам на рис. 3 и 4, энергетические уровни $W(p_{1*}, p_{2*}), W(0, p_{2*})$ данных систем отличаются

ся незначительно, то при заданных исходных параметрах может быть принята одноярусная система оттяжек. Этот результат соответствует положению о том, что в оптимальной системе без соответствующих ограничений лишние связи обнаруживают тенденцию к вырождению [13, 14].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренная методика составляет суть первого этапа расчета мачтовой системы – процедуру энергетической оптимизации с определением основных параметров конфигурации расчетной схемы. В их число могут включаться параметры топологии [5, 7], геометрической формы конструктивных элементов [6, 9], эксцентриситеты опорных устройств [13], параметры узловых соединений [14, 15], дискретные функции распределения физических параметров структурно-неоднородных конструкций и ряд других.

На втором этапе, описание которого выходит за рамки данной статьи, выполняется детальное проектирование системы по уточненным расчетным математическим моделям с использованием норм проектирования.

Используемый в решении задачи энергетический критерий характеризуется:

- фундаментальностью обоснования минимизируемой величины – потенциальной энергии деформации системы;
- универсальностью применения метода к системам различного типа;
- простотой действий при необходимости частичного учета видов деформации;
- связью рассмотренной постановки с динамическими задачами, в которых роль «энергоёмкости» системы имеет большое значение.

Список используемых источников

1. *Перельмутер А. В.* SCADOffice. Расчет мачт на оттяжках. – Киев: Изд-во СКАД СОФТ, 2004. – 46 с.
2. *Броверман Г. Б.* Строительство мачтовых и башенных сооружений. – М.: Стройиздат, 1984. – 256 с.
3. *Тетерс Г. А.* Многоцелевое оптимальное проектирование композитных конструкций. Обзор // Механика композитных материалов. – 1996. – Т. 32, № 3. – С. 363–376.
4. *Мищенко А. В.* Нелинейное термоупругое деформирование многофазных стержней // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2014. – № 4. – С. 42–51.
5. *Тамразян А. Г., Алексейцев А. В.* Современные методы оптимизации конструктивных решений для несущих систем зданий и сооружений // Вестник МГСУ. – 2020. – Т. 15, вып. 1. – С. 12–30. – DOI: 10.22227/1997-0935.2020.1.12-30.
6. *Алпатов В. Ю.* Об использовании критерия «энергетическая эффективность» при оптимизации конструктивной формы пространственных решетчатых конструкций // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре: материалы 68-й Всерос. научно-техн. конф. по итогам НИР 2010 г. – Самара: СамГАСУ, 2011. – С. 879–880.
7. *Крыжевич Г. Б., Филатов А. Р.* Комплексный подход к топологической и параметрической оптимизации судовых конструкций // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2020. – № 1 (391). – С. 95–108.
8. *Юрьев А. Г.* Естественный фактор оптимизации топологии конструкций // Вестник Белгородского государственного технологического университета имени В. Г. Шухова. – 2013. – № 5. – С. 46–48.

9. *Мищенко А. В.* Оптимизация структурно-неоднородных стержневых конструкций на основе энергетического критерия // Известия вузов. Строительство. – 2021. – № 6. – С. 20–32. – DOI: 10.32683/0536-1052-2021-750-6.
10. Нагрузки и воздействия на здания и сооружения / В. Н. Гордеев [и др.]. – М.: АСВ, 2007. – 482 с.
11. *Мищенко А. В., Немировский Ю. В.* Проектирование и анализ эффективности равнопрочных слоистых рам различных типов // Известия вузов. Строительство. – 1999. – № 9 (489). – С. 12–20.
12. *Ляхович Л. С.* Особые свойства оптимальных систем и основные направления их реализации в методах расчета сооружений. – Томск: Изд-во ТГАСУ, 2009. – 372 с.
13. *Лоцманова В. С., Владимирова Е. А.* Оптимизация опорных устройств рамных систем на основе энергетического критерия // Традиции, современные проблемы и перспективы развития строительства: сб. науч. ст. – Гродно: Гродненский гос. ун-т им. Я. Купалы, 2021. – С. 141–145.
14. Оптимизация нагельных соединений в деревянных конструкциях / Г. И. Гребенюк [и др.] // Известия вузов. Строительство. – 1995. – № 11. – С. 21–26.
15. Оптимизация параметров деревянных рамных конструкций с узловыми соединениями на нагелях / Г. И. Гребенюк [и др.] // Известия вузов. Строительство. – 1999. – № 11 (491). – С. 4–9.

В. О. Головчинский,
кандидат технических наук;
Ю. А. Каменев,
кандидат технических наук;
С. С. Рябова;
А. С. Соломахин,
кандидат технических наук, доцент;
А. М. Сычева,
доктор технических наук, доцент

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕМПЕРАТУРНОГО ЛИНЕЙНОГО РАСШИРЕНИЯ ЖАРОСТОЙКОГО ПЕНОБЕТОНА ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В КОНСТРУКЦИЯХ ГАЗОХОДА СТАРТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ

В статье рассмотрены и проанализированы результаты исследования коэффициента температурного линейного расширения при различных температурах и скоростях нагрева образцов жаростойкого пенобетона, а также времени его выдержки, для применения в конструкции газохода стартового сооружения. Класс по средней плотности жаростойкого пенобетона D700. Показано, что при первом цикле прогрева коэффициент температурного линейного расширения жаростойкого пенобетона имеет отрицательное значение.

Ключевые слова: жаростойкий пенобетон, коэффициент температурного линейного расширения, стартовое сооружение, газоход.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования связана с возможностью использования жаростойкого пенобетона (ЖПБ) с заданными свойствами в качестве материала для конструкций газоходов (ГХ) стартовых сооружений (СС). На рис. 1 показано ранее предложенное разделение ГХ в зависимости от интенсивности теплового воздействия [1] на основную (А) зону, куда приходится наибольшее тепловое воздействие и периферийную (Б) зону, куда приходится значительно меньшее воздействие от ГДС.

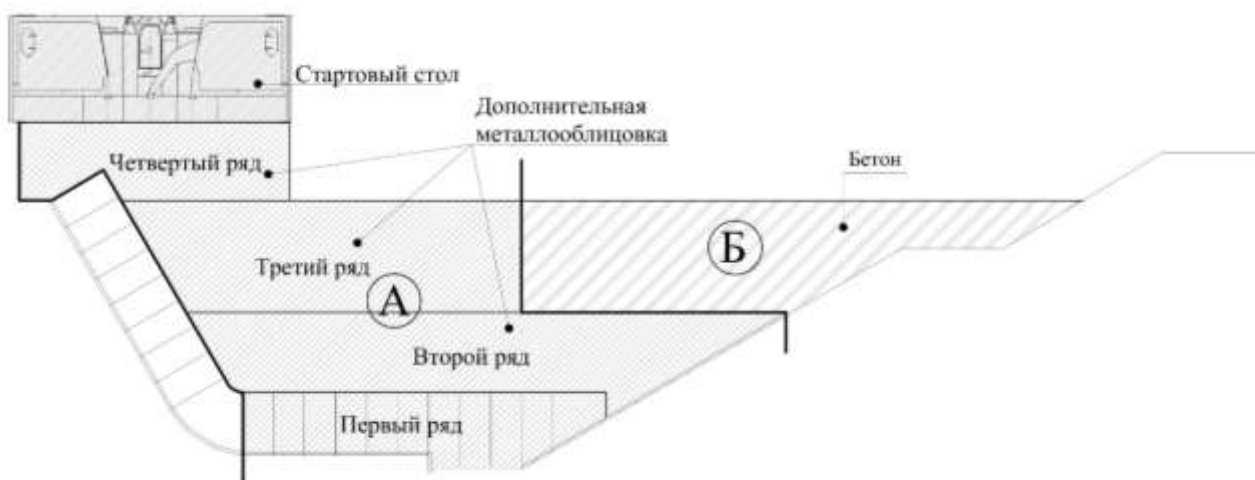


Рис. 1. Разделение газохода на зоны:
А – основная; Б – периферийная

Предположительно использование в качестве материала конструкций ГХ ЖПБ под металлооблицовку в соответствующей зоне А сможет снизить тепловое воздействие на верхнее перекрытие и ограждающую конструкцию, а также демпфировать нагрузки, возникающие при температурном расширении металлооблицовки. Для обеспечения перечисленных условий необходимо учитывать такую характеристику материала как коэффициент температурного линейного расширения (КТЛР).

Коэффициент линейного расширения бетона связан с характеристиками теплопроводности и теплоемкости. Он определяет изменение линейного размера материала при воздействии на него высокой или низкой температуры. КТЛР равен относительному удлинению 1 м материала при увеличении его температуры на 1°C [2]. Этот коэффициент играет большую роль при выборе составляющих материалов при проектировании композиционных материалов. Принципиальное значение КТЛР при высокотемпературном нагреве сказывается на долговечности: чем ниже показатель КТЛР, тем выше долговечность конструкции.

КТЛР бетона зависит от модуля деформации заполнителя, объемного соотношения заполнителя и цементного раствора, влажности и температуры. КТЛР легкого заполнителя меньше, чем у обычного заполнителя. Так, КТЛР глиняного, сланцевого и шиферного керамзита меньше, чем у природного гравия на 50–70%. Однако различие для бетонов, изготовленных на основе этих заполнителей, значительно меньше, так как температурное расширение природного заполнителя ограничивается температурными деформациями затвердевшего цементного раствора. Это свидетельствует о существенном влиянии цементного камня на КТЛР бетона. Для легких бетонов он составляет примерно $7-10 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, а для обычных щебеночных бетонов – $6-9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [3].

Для определения КТЛР ЖПБ был выполнен ряд испытаний с целью выявления его изменения с повышением температуры и при различных скоростях нагрева.

Исследование характеристик материалов при повышенных температурах (жаростойкость, КТЛР и др.) исследуется при скоростях нагрева, как правило, до 2,5°C/мин [4].

В данной работе исследование КТЛР ЖПБ проводилось при трех различных температурах (0,25; 0,5; 1°C/мин) по методике, разработанной национальным исследовательским центром «Курчатовский институт» и в соответствии с нормативной документацией [5].

Определение ТКЛР заключается в совместном измерении удлинения образца и изменения его в заданном диапазоне температур. ТКЛР выражает рассчитанное относительное изменение линейных размеров образца при изменении температуры.

ТКЛР в заданном интервале температур вычисляется по формуле

$$\alpha_{20-T_i} = \frac{L_{T_i} - L_{20}}{L_{20}(T_i - 20)},$$

где L_{20} – начальная длина образца при температуре 20°C, мм;
 L_{T_i} – длина образца при температуре T_i , мм;
 T_i – температура измерения.

Исследование КТЛР ЖПБ при высоких скоростях нагрева, соответствующего нагрузкам от газодинамической струи на стартовом сооружении, лимитируется возможностями оборудования и в данной работе не проводилось.

Объект исследования – конструкции ГХ СС с применением жаростойкого пенобетона неавтоклавно твердения в условиях повышенных температур.

Предмет исследования – КТЛР жаростойкого пенобетона.

Цель работы – определение КТЛР пенобетона при различных скоростях нагрева и в различных диапазонах температур.

В результате исследования была проанализирована указанная характеристика, полученная при различных температурах и скоростях нагрева, а также времени выдержки жаростойкого пенобетона средней плотности D700.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕМПЕРАТУРНОГО ЛИНЕЙНОГО РАСШИРЕНИЯ

Определение КТЛР образцов пенобетона проводилось с различными скоростями нагрева – 0,25; 0,5 и 1 °С/мин до температур 200 и 400°С. Время выдержки образцов по достижении каждой из температур – 96 ч (4 сут). Размер образцов 50x10 мм, средняя плотность – D700. Состав ЖПБ приведен в табл. 1.

Таблица 1

Расход сырьевых материалов на 1 м³ пенобетонной массы

Цемент, кг	Базальтовый порошок, кг	Фибра, кг	Вода, л	Раствор пенообразователя, л		
				Вода	Пено- образователь	Стабили- затор
520	130	10	234	58	1,8	0,12

С учетом этих требований при разработке состава жаростойкого пенобетона применяли следующие компоненты.

В качестве вяжущего предложено использовать портландцемент (ЦЕМ II А-III 42,5Н в соответствии с ГОСТ 31108-2016).

В качестве основного заполнителя предложено использовать базальтовый песок с размером частиц не более 0,63 мм. Базальт устойчив к высокотемпературным воздействиям, имеет низкое значение коэффициента температурного расширения ($КТР \approx 6,5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) и имеет пониженный коэффициент теплопроводности.

С целью повышения деформативности и жаростойкости в состав пенобетона предложено ввести базальтовую фибру с длинных волокон 12 мм, покрытую замасливателем на силановой основе KB-13.

Рекомендуемая пенообразующая добавка – на протеиновой основе, например «FoamСem» (производитель «Laston SPA»).

Для улучшения качества пены в работе предложено использовать стабилизатор – золь кремниевой кислоты (рН<7) «КС-К» (производитель ООО «СИТЕК», г. Санкт-Петербург, Россия).

Вода для приготовления жаростойкого пенобетона должна удовлетворять требованиям ГОСТ 23732-79.

В ходе проведения эксперимента были получены результаты, которые рассмотрены ниже.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КТЛР ОБРАЗЦОВ ПЕНОБЕТОНА ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ 200°С

Определение КТЛР образцов пенобетона при скорости нагрева 0,25°С/мин (рис. 1).

Определение КТЛР образцов пенобетона при скорости нагрева 0,5°С/мин (рис. 2).

Определение КТЛР образцов пенобетона при скорости нагрева 1°С/мин (рис. 3).

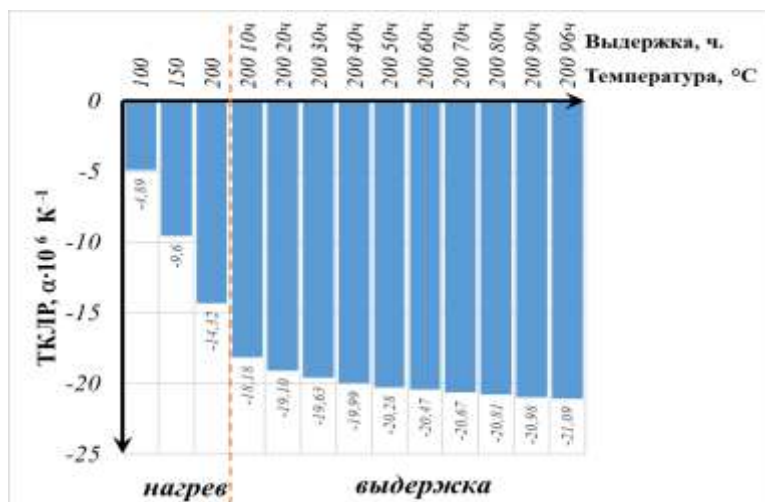


Рис. 1. Изменение КТЛР (скорость 0,25 °С/мин, температура выдержки 200°С)

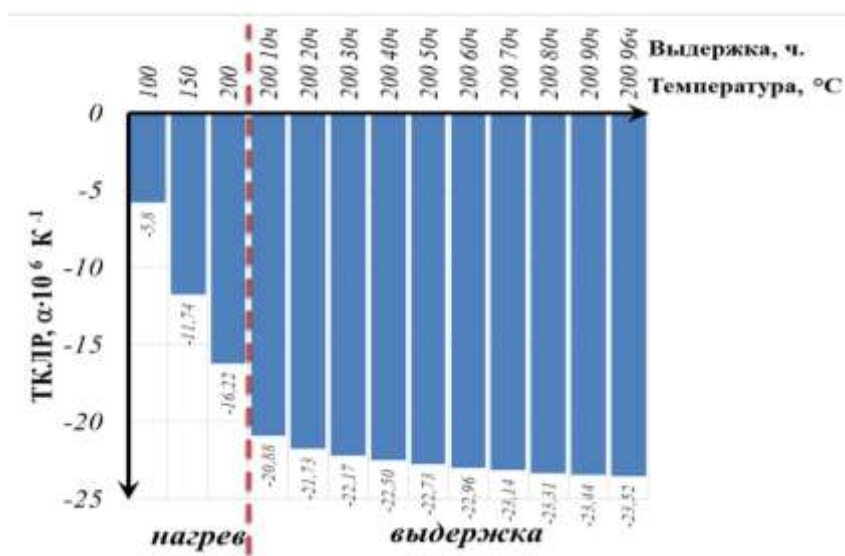


Рис. 2. Изменение КТЛР (скорость 0,5 °С/мин, температура выдержки 200°С)

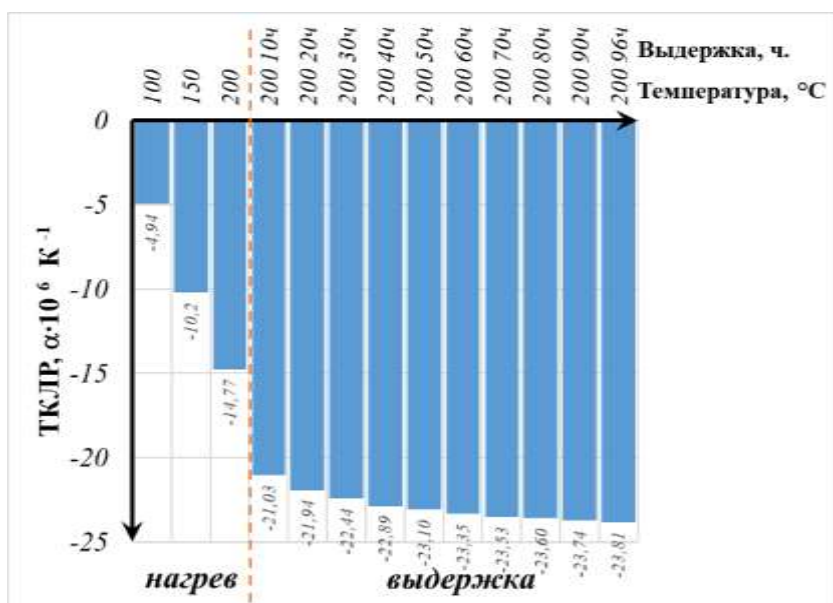


Рис. 3. Изменение КТЛР (скорость 1 °С/мин, температура выдержки 200°С)

Проанализируем результаты значений КТЛР, полученные в ходе нагрева и выдержки при заданной температуре 200°C:

1) скорость нагрева 0,25 °С /мин: КТЛР при нагреве снижается в 2,9 раза, при дальнейшей выдержке – в 1,5 раза, в целом – в 4,3 раза;

2) скорость нагрева 0,5 °С /мин: КТЛР при нагреве снижается в 2,8 раза, при дальнейшей выдержке – в 1,4 раза, в целом – в 4 раза;

3) скорость нагрева 1 °С /мин: КТЛР при нагреве снижается в 3 раза, при дальнейшей выдержке – в 1,6 раза, в целом – в 4,8 раза.

В среднем при всех скоростях нагрева для всего цикла обработки (нагрев+выдержка) КТЛР образцов пенобетона снижается в 4,55 раза.

При нагреве образцов КТЛР снижается в среднем в 2,9 раза, во время последующей выдержки в среднем в 1,5 раза.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КТЛР ОБРАЗЦОВ ПЕНОБЕТОНА ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ 400°C

Определение КТЛР образцов пенобетона при скорости нагрева 0,25°C/мин (рис. 4).

Определение КТЛР образцов пенобетона при скорости нагрева 0,5°C/мин (рис. 5).

Определение КТЛР образцов пенобетона при скорости нагрева 1°C/мин (рис. 6).

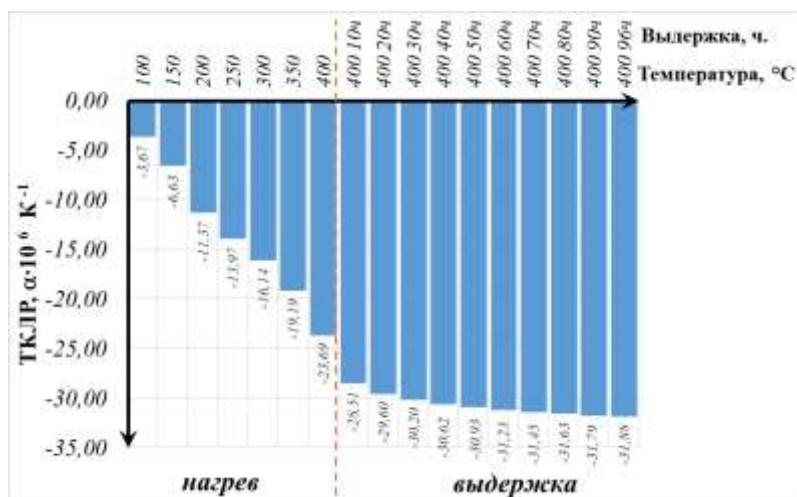


Рис. 4. Изменение КТЛР (скорость 0,25 °С/мин, температура выдержки 400°C)

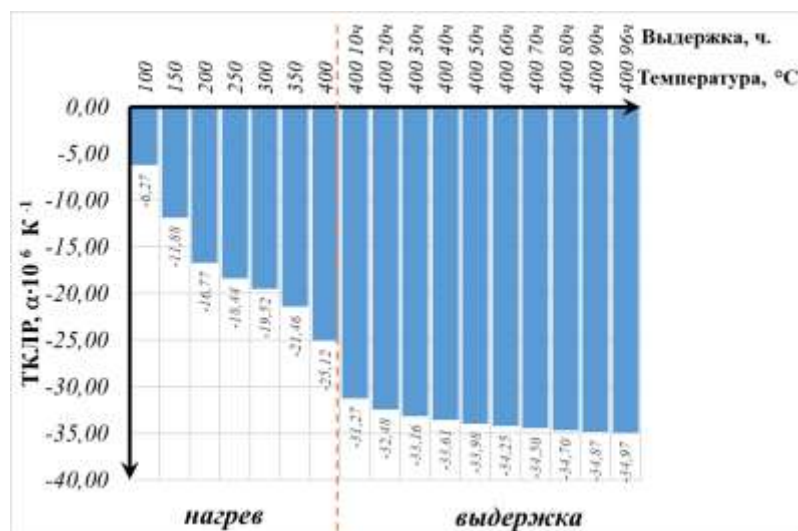


Рис. 5. Изменение КТЛР (скорость 0,5 °С/мин, температура выдержки 400°C)

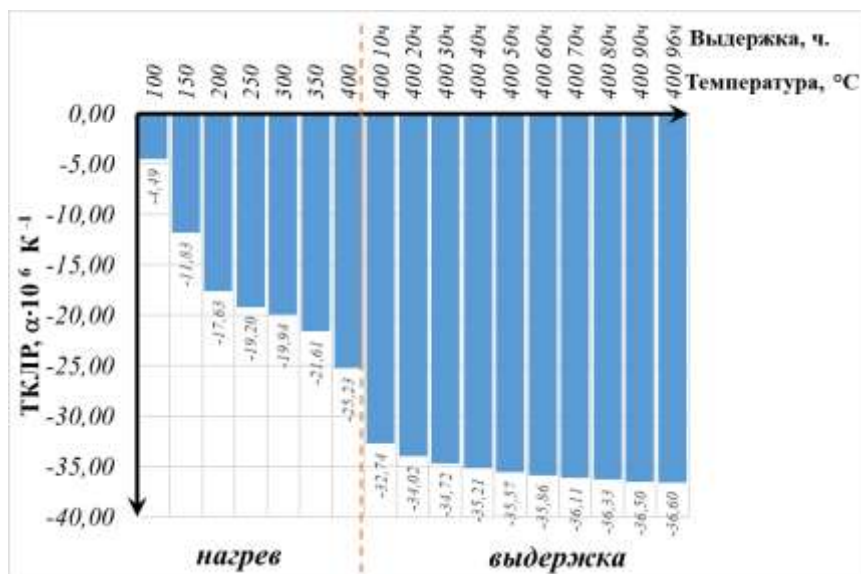


Рис. 6. Изменение КТЛР (скорость $1^\circ\text{C}/\text{мин}$, температура выдержки 400°C)

Проанализируем результаты значений КТЛР, полученные в ходе нагрева и выдержки при заданной температуре 400°C :

1) скорость нагрева $0,25^\circ\text{C}/\text{мин}$: КТЛР при нагреве снижается в 6,4 раза, при дальнейшей выдержке – в 1,3 раза, в целом – в 8,6 раза;

2) скорость нагрева $0,5^\circ\text{C}/\text{мин}$: КТЛР при нагреве снижается в 4 раза, при дальнейшей выдержке – в 1,4 раза, в целом – в 5,6 раза;

3) скорость нагрева $1^\circ\text{C}/\text{мин}$: КТЛР при нагреве снижается в 5,6 раза, при дальнейшей выдержке – в 1,4 раза, в целом – в 8,1 раза.

В среднем при всех скоростях нагрева для всего цикла обработки (нагрев + выдержка) КТЛР образцов пенобетона снижается в 8,4 раза.

При нагреве образцов КТЛР снижается в среднем в 6 раз, во время последующей выдержки в среднем в 1,4 раза.

Из полученных данных видно, что основное снижение КТЛР идет в период нагрева образцов и менее значительное – в период их последующей выдержки в течение 96 ч.

Значения КТЛР образцов пенобетона в течение их полной обработки (нагрев + выдержка) при 400°C снижается в 1,8 раза больше, чем значения КТЛР в течение их полной обработки при 200°C ; в течение разогрева значение КТЛР образцов снижается в 2 раза больше при 400°C по сравнению с 200°C , в течение выдержки образцов при этих температурах снижение практически одинаковое.

1. Изменение полной величины усадки образцов, при разогреве до 200°C , а также последующей выдержке и охлаждении при увеличении скорости нагрева (от $0,25$ до $1^\circ/\text{мин}$) меняется мало; при полной обработке при 400°C наблюдается тенденция к увеличению ее значения до 17% с увеличением скорости нагрева (от $0,25$ до $1^\circ/\text{мин}$), что скорее связано с неравномерным распределением фибры в образцах и, как результат, большим разбросом значений усадки.

2. Основная усадка происходит при разогреве образцов, это $\sim 50\%$ от полной усадки для температуры 200°C и $\sim 57\%$ от полной усадки для температуры 400°C .

3. При выдержки образцов в течение 96 ч среднее значение усадки (для всех скоростей нагрева) составляет $\sim 32\%$ от полной усадки для температуры 200°C и $\sim 25\%$ от полной усадки для температуры 400°C .

4. Значение полной усадки для обеих температур не превышает 1,76%, что соответствует требованиям ГОСТ 20910-2019 «Бетоны жаростойкие. Технические условия» (не более 2%).

5. Среднее значение полной усадки для всех скоростей нагрева при температуре 400°C в 3,7 раза выше, чем при температуре 200°C.

6. Погрешность между двумя одинаковыми измерениями составила более 10%, что может быть связано с неравномерным распределением фибры в образцах и неравномерными значениями КТЛР.

В соответствии с ранее предложенным разделением ГХ [1] на соответствующие зоны (А, Б) в зависимости от температуры воздействия газодинамической струи, можно сказать, что применение ЖПБ в конструкции ГХ СС возможно в зоне А (под металооблицовкой) с пониженным значением КТЛР. Такое решение позволит ЖПБ воспринять температурное расширение металла, что повысит долговечность ГХ СС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в ходе проведенного исследования и на основе полученных результатов по значению коэффициента температурного линейного расширения образцов жаростойкого пенобетона при различных температурах и скоростях нагрева можно сделать следующие выводы:

1. В результате выполнения первого цикла нагревания до 200 и 400 °С и дальнейшей выдержки при этих температурах в течение 96 часов происходит первичная усадка образцов, что характерно для материалов на основе портландцемента.

2. В итоге эффект КТЛР имеет отрицательное значение. КТЛР бетонов и ячеистых материалов, приводимые в литературных данных, соответствуют не первому, а последующим циклам нагрева, при которых после усадки начинается расширение материала [6–10]. Усадка, вероятно, связана с удалением сорбционной и химически связанной воды из гидросиликатов цементного камня.

3. Значения КТЛР в результате нагрева до 200 и 400 °С с различными скоростями (0,25; 0,5; 1 °С /мин) изменяется незначительно.

4. Применение ЖПБ в конструкции ГХ СС предположительно позволит повысить долговечность ГХ СС, за счет пониженного значения КТЛР.

Список используемых источников

1. Синтез жаростойкого пенобетона для применения в конструкциях газоходов стартовых сооружений / А. М. Сычева [и др.] // Актуальные проблемы защиты и безопасности: тр. XXV Всероссийской научно-практической конф. Санкт-Петербург, 04–07 апреля 2022 года. – СПб.: Российская академия ракетных и артиллерийских наук, 2022. – С. 46–51.

2. *Широкородюк В. К.* Строительные материалы: учеб. пособие. – Краснодар: КубГАУ, 2020. – 86 с.

3. *Ху Шугуан, Ван Фа Чжоу.* Легкие бетоны. – М.: изд-во «АСВ», 2016. – 304 с.

4. ГОСТ 20910-2019. Бетоны жаростойкие. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2019. – 6 с.

5. ГОСТ Р 56466-2015. Системы космические. Методы испытаний материалов. Метод определения температурного коэффициента линейного расширения композиционных материалов при высоких температурах. – М.: Стандартинформ, 2019. – 12 с.

6. *Некрасов К. Д.* Влияние высоких температур на физико-химические свойства гидротированных клинкерных минералов // Физико-химические и технологические основы жаростойких цементов и бетонов: сб. тр. – М.: Академия наук СССР, 1986. – С. 211–223.

7. *Бутт Ю. М., Тимашев В. В.* Портландцементный клинкер. – М.: Стройиздат, 1967. – 303 с.

8. *Некрасов К. Д. Тарасова А. П.* Жаростойкий бетон на портландцементе. – М.: Стройиздат, 1969. – 190 с.
9. *Некрасов К. Д.* Жароупорный бетон. – М.: Промстройиздат, 1975. – 283 с.
10. *Жданова Н. П.* Особо легкий жаростойкий бетон на быстротвердеющем портландцементе и силикат-глыбе // Физико-химические и технологические основы жаростойких цементов и бетонов: сб. тр. – М.: Академия наук СССР, 1986. – С. 76–82.

Ю. Н. Пирогов*,

кандидат технических наук;

А. В. Попов*,

кандидат технических наук;

Г. Р. Самарина*;

Ф. Е. Шарыкин*

*ФАУ «25 ГосНИИ химмотологии Минобороны России», г. Москва.

КОНЦЕПЦИЯ МОДУЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ МОБИЛЬНЫХ ПОЛЕВЫХ СКЛАДОВ ГОРЮЧЕГО

На базе модульного подхода к структуре и составу обоснована и разработана концепция создания перспективных мобильных полевых складов горючего. Сформулированы требования и даны предложения по техническому оснащению объектов полевых складов горючего переменной вместимости. Рассмотрены варианты их адаптации к размерам оперативных запасов и среднесуточному грузообороту в соответствии с потребностью на расход войсковой группировки в составе до общевойсковой (танковой) армии с силами и средствами усиления.

Ключевые слова: полевой склад горючего, концепция, модульная структура, автономность, математическое моделирование, грузооборот, техническое оснащение.

ВВЕДЕНИЕ

Основу материально-технической базы службы горючего составляют склады, выполняющие функцию накопления и содержания установленных запасов. Учитывая рост потребления различных видов материальных средств, постоянно ведутся работы по совершенствованию соответствующей инфраструктуры, проводится модернизация существующих, и разработка новых объектов хранения различного назначения, в том числе полевых складов горючего [1, 2].

Мобильность войсковых запасов горючего подразделений (частей и соединений) обеспечивается их содержанием и перемещением в специальном автомобильном транспорте. Для содержания запасов и подвоза горючего выделяются соответствующие наливные средства: автотопливозаправщики и автомобильные цистерны (АЦ) для горючего. Пополнение войсковых запасов в соединениях осуществляется подвозом, как правило, с полевых складов оперативных (оперативно-стратегических) объединений, предназначенных для содержания запасов, которые обеспечивают восполнение расхода в течение заданного периода времени [3, 4].

Одним из первых шагов по модернизации полевых складов горючего было повышение их мобильности за счет замены металлических резервуаров на резиноканевые (МР), меньшие по вместимости из которых были приспособлены для перевозки бортовыми автомобилями в заполненном состоянии. Такая замена сократила трудозатраты и потребность в автотранспорте при передислокации складов, которые оставались весьма габаритными, так как состояли из отделов большой вместимости (2000 м³ и 4000 м³). Комплектование отделов хранения транспортными резервуарами способствовало повышению мобильности, однако практика их применения в локальных конфликтах выявила высокий риск повреждений в пути деталями кузова и недостаточную вместимость для современных транспортных средств подразделений подвоза. Кроме того, МР в сравнении с зарубежными образцами показывали недостаточную морозостойкость, высокие значения удельной массы и топливопроницаемости [5].

В целях устранения данных недостатков вместо МР разработаны и приняты на снабжение Вооруженных Сил Российской Федерации (ВС РФ) эластичные резервуары (ЭР) на основе

термопластичных полиуретанов, ставшие материальной базой для создания полевых складов горючего нового поколения [6].

РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ МОДУЛЬНОГО СКЛАДА

В соответствии с Указом Президента Российской Федерации «О реализации планов (программ) строительства и развития ВС РФ, других войск, воинских формирований, органов и модернизации оборонно-промышленного комплекса» [7], возможности сил и средств материально-технического обеспечения (МТО) должны отвечать современным требованиям.

Опыт МТО учений показал, что состав войсковых группировок и их потребность в горючем могут существенно различаться, а структура резервуарного парка и производственные возможности существовавших полевых складов не обеспечивают их гибкой адаптации к изменениям потребности в запасах и среднесуточного расхода горючего.

Соответствие возможностей перспективных полевых складов горючего требованиям оперативных войсковых группировок различного состава к размерам запасов и среднесуточному расходу предлагается обеспечивать на основе модульного принципа их структуры и состава. В этом случае адаптация склада к изменению потребности в горюче смазочных материалах (ГСМ) обеспечиваемых группировок войск может быть достигнута наращиванием вместимости и производственных возможностей по приему и выдаче за счет развертывания необходимого числа автономных технологических модулей, обеспечивающих возможность перемещения складов на новое место развертывания по частям, по мере освобождения резервуаров.

В качестве прототипа группы хранения модульного полевого склада горючего (МПСГ) предлагается использовать, после соответствующей модернизации, положительно зарекомендовавший себя на совместных стратегических учениях МТО «Запад-2017», «Восток-2018» и «Центр-2019» полевой склад горючего вместимостью 600 м³ (ПСГ-600), резервуарная группа которого представлена на рис. 1.



Рис. 1. Резервуарная группа полевого склада горючего ПСГ-600 (перед заполнением)

Количество модулей такого склада для конкретной войсковой группировки должно определяться исходя из условия гарантированного наличия установленных запасов без существенного риска их отсутствия.

Модульный принцип создания полевых складов горючего обуславливает соответствующие требования не только к резервуарной емкости, но и ко всем основным объектам, включая технологические схемы гидравлической обвязки.

Вместимость МПСГ должна задаваться оперативно-тыловыми требованиями и в общем случае составлять не менее двухсуточной потребности обеспечиваемой группировки. Вместимость резервуарного парка и производственные возможности по приему и отгрузке горючего каждого технологического модуля соответственно должны обеспечивать двухсуточную потребность соединения с силами и средствами усиления [8, 9].

Исходя из практики применения МР и ЭР наиболее удобными для немеханизированных процессов развертывания и свертывания являются резервуары вместимостью не более 50 м^3 , в связи с чем целесообразно резервуарные блок-модули МПСГ комплектовать термополиуретановыми резервуарами ЭР-50 вместимостью 50 м^3 [10].

Для обеспечения автономности функционирования каждый технологический модуль должен включать блок-модули ЭР, средств перекачки, трубопроводов, комплектов оборудования участков массовой выдачи горючего в автомобильный транспорт (УМВГ), слива железнодорожных цистерн (УСЖДЦ), а также хранения тарных ГСМ [2]. Вариант принципиальной схемы состава и структуры МПСГ представлен на рис. 2.



Рис. 2. Принципиальная схема состава и структуры МПСГ (вариант)

Оборудование технологических модулей, за исключением рукавов и средств перекачки, предлагается хранить и транспортировать в стандартных 20-футовых контейнерах типа 1С, в пакетах и на поддонах. Имущество лаборатории и медицинского пункта, средства связи и другое малогабаритное оборудование базового модуля также необходимо содержать в транспортных контейнерах, которые после освобождения могут служить для временного размещения личного состава и вспомогательного оборудования.

Кроме автономных технологических модулей для бесперебойного функционирования объектов склада, их технического обслуживания, а также бытового обеспечения личного состава в МПСГ любой вместимости структурно должен входить базовый модуль.

Вместимость блок-модулей ЭР и тарных ГСМ, производственные возможности по сливу (наливу) блок-модулей УМВГ и УСЖДЦ, количество и подача средств перекачки, длина и диаметр трубопроводов технологических модулей МПСГ должны определяться исходя из среднесуточного расхода горючего обеспечиваемым оперативным (оперативно-

стратегическим) объединением и установленными для склада размерами запасов, выраженными в сутках боевых действий.

ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ НАЗНАЧЕНИЯ

Гармоничность производственных и технических характеристик функционирования блок-модулей в составе технологического модуля может быть обеспечена корректностью обоснования требований назначения на основе системного подхода. Для этого, а также для учета вероятностного характера процессов предлагается воспользоваться математическими моделями применения основных блок-модулей в соответствии с их функциональным предназначением.

Основным показателем требований назначения выступает объем текущих запасов на складе, который является случайной величиной, зависящей от расхода горючего потребителями и регулярности их пополнения во времени. Он также зависит от выбора стратегии управления запасами, времени выполнения заявки на их пополнение, размера партий подвоза и отгрузки, а также вместимости резервуарной емкости. Обоснование требований к вместимости резервуарных парков МПСГ реализуемо с помощью математических методов теории управления запасами [11, 12].

В качестве критериев достаточности резервуарной емкости могут использоваться допустимые вероятности (риски) отсутствия запасов и (или) свободной резервуарной емкости, требования обеспечения высоких гарантий наличия, например, не менее суточной потребности на расход одной или нескольких средних расчетных партий отгрузки, и т. п. [6].

Вероятностные модели управления запасами базируются на математическом аппарате теории массового обслуживания (ТМО), при этом текущие запасы могут интерпретироваться как очередь, а параметры потоков поступления заявок (λ) и обслуживания (μ) представляют собой интенсивности поступления и отгрузки горючего соответственно [8].

Так как математический аппарат ТМО оперирует с дискретными величинами, за расчетную единицу в моделях предлагается принимать минимальное значение из партий поставки или отгрузки. Наибольший практический интерес для МПСГ представляет случай поставки горючего партиями, существенно превышающими размер партий выдачи, например, когда подвоз осуществляется батальонами, а вывоз – ротами (или наоборот). В этих условиях задача управления запасами состоит в оптимизации значений вместимости резервуаров и размера партий поставки.

Управление запасами горючего может осуществляться как подачей заявок на подвоз, так и на вывоз. Оптимизация потребности в резервуарной емкости осуществляется при установленном уровне функционирования склада, который может задаваться допустимыми вероятностями отсутствия запасов и (или) свободной резервуарной емкости, их гарантированного наличия, а также размером средних запасов [10].

Статистически значения λ и μ определяются через значения величин партий подвоза (Q_{nn}) и выдачи (q):

$$\lambda = \frac{G_{\text{сут}}}{24 \cdot Q_{nn}}, \quad (1)$$

$$\mu = \frac{G_{\text{сут}}}{24 \cdot q}, \quad (2)$$

где $G_{\text{сут}}$ – среднесуточный объем выдачи горючего со склада, т (м^3).

Если подвоз горючего на склад осуществляется по заявкам (управление запасами), то $\lambda = 1/t_{\text{вз}}$, где $t_{\text{вз}}$ – среднее время выполнения заявки на пополнение запасов, ч.

Чтобы воспользоваться математическим аппаратом ТМО, размер партий поставки горючего на склад выражается в партиях его выдачи потребителям:

$$m = \frac{Q_{nn}}{q}. \quad (3)$$

При такой интерпретации задача сводится к реализации модели массового обслуживания с групповым поступлением заявок [8, 11], где m – размер групповой заявки на обслуживание, выраженный через партии выдачи.

Размеченный граф вероятностей состояний такой системы представлен на рис. 3, где принято, что $m = 3$, а вместимость расходных резервуаров склада равна k партиям выдачи.

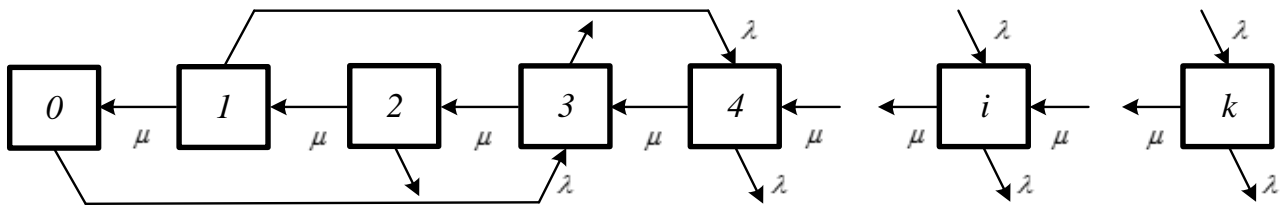


Рис. 3. Размеченный граф вероятностей состояний наличия запасов текущего снабжения на полевом складе горючего

В общем случае при m партиях выдачи в одной партии поставки система дифференциальных уравнений для вероятностей состояний (P_i) наличия запасов горючего на полевом складе имеет вид [8]

$$\frac{dP_i}{dt} = -(\lambda + \mu) \cdot P_i + \mu \cdot P_{i+1} + \lambda \cdot P_{i-m}. \quad (4)$$

В установившемся режиме при $t \rightarrow \infty$, $dP_i/dt = 0$, система дифференциальных уравнений превращается в систему линейных, к которой добавляется очевидное условие:

$$\sum_{i=0}^{\infty} P_i = P_0 \cdot \sum_{i=0}^{\infty} f_i(\mu, \lambda) = 1, \text{ откуда } P_0 = \frac{1}{\sum_{i=0}^{\infty} f_i(\mu, \lambda)}, \quad (5)$$

где P_0 – вероятность отсутствия запасов горючего на складе.

Расчет значений функции $f_i(\mu, \lambda)$ осуществляется по рекуррентным формулам системы алгебраических уравнений [9].

Вероятность отсутствия свободной резервуарной емкости рассчитывается по следующей зависимости:

$$P_{>k} = 1 - \sum_{i=0}^{i=k} i \cdot P_i. \quad (6)$$

Средний размер запасов горючего на складе рассчитывается по формуле

$$V_{cp} = \sum_{i=1}^k q \cdot i \cdot P_i \quad (7)$$

При необходимости расчета других неформальных параметров могут использоваться известные зависимости теории вероятностей с соответствующей интерпретацией исходных данных и результатов.

В соответствии с требованиями пожарной безопасности горючее на полевых складах должно размещаться группами вместимостью до 500 т (600 м³). Ориентировочно столько же составляет ожидаемая среднесуточная потребность в горючем оперативных группировок минимального прогнозируемого состава. Для обеспечения их двухсуточной потребности вместимость резервуарного парка должна составлять ~ 1200 м³, а производственные возможности, как по приему, так и по отгрузке горючего, должны быть не ниже 600 м³/сут. В этой связи данные значения вместимости и грузооборота могут быть приняты в качестве нормативных требований к оперативным характеристикам технологических модулей МПСГ [13].

Основным транспортом подвоза горючего в оперативном звене тыла считается автомобильный. При отсутствии возможности поставки ГСМ на полевой склад по железной дороге участок слива-налива автомобильных подразделений подвоза должен быть рассчитан на прием и отгрузку в среднем по 600 м³/сут, даже если часть горючего будет передаваться из транспорта в транспорт. Процесс подвоза и отгрузки горючего на полевом складе носит случайный характер, поэтому для обоснования тактико-технических требований к УМВГ предлагается воспользоваться вероятностной математической моделью процесса на основе математического аппарата ТМО. Процесс функционирования УМВГ МПСГ в большинстве случаев может быть смоделирован в виде одноканальной разомкнутой системы массового обслуживания (СМО) с очередью [9, 11].

В соответствии с общими оперативно-тактическими требованиями к полевым складам горючего производственные возможности УМВГ на них должны обеспечивать налив (слив) автомобильных подразделений подвоза горючего в установленные сроки с вероятностью, не ниже заданной, с учетом частоты и неравномерности их поступления на склад, а также потерь времени на ожидание в очереди, вытягивание колонн и оформление документов [3].

Оперативными требованиями к УМВГ директивно должно задаваться время налива (слива) автомобильных колонн, а также максимально допустимое их количество и время пребывания в очереди под налив (слив), обеспечивающие выполнение поставленной задачи.

Время пребывания автомобильных колонн в очереди, а также количество подразделений подвоза в районе ожидания (в очереди под налив или слив) для снижения риска обнаружения противником должны быть минимизированы.

Основными параметрами УМВГ как СМО являются [9]:

λ – интенсивность прибытия подразделений на склад, 1/ч;

μ – интенсивность обслуживания подразделений подвоза, 1/ч;

Значения величин λ и μ в общем случае определяются из зависимостей:

$$\lambda = \frac{1}{t_1}; \quad (8)$$

$$\mu = \frac{1}{t_2}, \quad (9)$$

где t_1 – средний интервал времени между моментами прибытия подразделений подвоза (вывоза) под слив (налив), ч;

t_2 – среднее время слива (налива) одного подразделения подвоза, ч.

При расчете параметров УМВГ как одноканальной разомкнутой СМО с очередью используется обобщенный параметр:

$$\varphi = \frac{\lambda}{\mu}. \quad (10)$$

Размеченный граф состояний УМВГ как разомкнутой одноканальной СМО с очередью представлен на рис. 4.

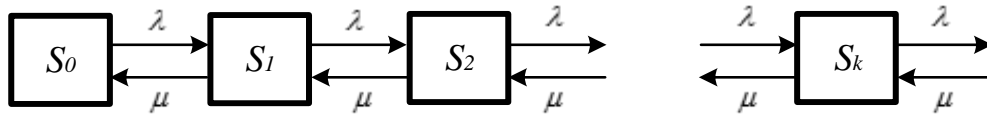


Рис. 4. Граф состояний одноканальной разомкнутой СМО с ожиданием

Вероятности состояний УМВГ как разомкнутой одноканальной СМО с очередью описываются системой дифференциальных уравнений Колмогорова [9, 11]:

$$\begin{cases} \frac{dP_0}{dt} = -\lambda \cdot P_0 + \mu \cdot P_1, \\ \frac{dP_i}{dt} = -(\lambda + \mu) \cdot P_i + \lambda \cdot P_{i-1} + \mu \cdot P_{i+1}, \text{ при } i > 0, \end{cases} \quad (11)$$

где P_i – вероятности i -го состояния системы.

На бесконечности система (11) превращается в систему линейных уравнений:

$$\begin{cases} -\lambda \cdot P_0 + \mu \cdot P_1 = 0, \\ -(\lambda + \mu) \cdot P_i + \lambda \cdot P_{i-1} + \mu \cdot P_{i+1} = 0, \text{ при } i > 0, \end{cases} \quad (12)$$

решения которых имеют вид:

$$P_0 = 1 - \varphi, \quad P_k = \varphi^k \cdot (1 - \varphi). \quad (13)$$

Неформальные характеристики СМО рассчитываются по следующим формулам:

– среднее число подразделений, находящихся в очереди:

$$r = \frac{\varphi^2}{(1 - \varphi)}; \quad (14)$$

– среднее число подразделений, находящихся под наливом (сливом):

$$k = \frac{\varphi}{(1 - \varphi)}; \quad (15)$$

– общее среднее число подразделений, находящихся на складе:

$$\omega = r + k; \quad (16)$$

– среднее время ожидания налива (слива) в очереди:

$$t_{ож} = \frac{\varphi}{\mu \cdot (1 - \varphi)} = \frac{\varphi^2}{\lambda \cdot (1 - \varphi)}; \quad (17)$$

– среднее время пребывания подразделения на складе:

$$t_{сум} = \frac{1}{\mu \cdot (1 - \varphi)}; \quad (18)$$

– вероятность, что на УМВГ находится m подразделений подвоза:

$$P_m = \varphi^m \cdot (1 - \varphi), \quad (19)$$

– вероятность занятости УМВГ:

$$P_{\text{о}} = \varphi, \quad (20)$$

– вероятность, что время ожидания в очереди больше $t_{\text{доп}}$:

$$P_{\{B\}t_{\text{доп}}} = \varphi \cdot \exp[-(\mu - \lambda) \cdot t]; \quad (21)$$

– вероятность, что число подразделений в очереди больше k :

$$P_{>k} = 1 - \sum_{i=0}^{k+1} P_i. \quad (22)$$

В случае, когда МПСГ развертывается на существующем или восстанавливаемом железнодорожном направлении, наиболее благоприятным вариантом пополнения запасов на полевых складах является поставка горючего железнодорожными наливными транспортом. Производственные возможности УСЖДЦ МПСГ должны обеспечивать слив расчетных железнодорожных наливных транспортов в нормативные сроки, не допуская длительного простоя и скопления их на подъездных путях, с учетом частоты и неравномерности поступления на склад.

Оперативно-тыловые требования к пропускной способности УСЖДЦ определяются среднесуточным расчетным объемом поступления горючего железнодорожным транспортом и грузоподъемностью ЖДЦ. Их пребывание на складе под сливом в мирное время ограничено требованиями Минтранса России с применением штрафных санкций за сверхнормативный простой. В особый период, даже при соблюдении указанных требований, в интересах обеспечения скрытности и живучести должны предъявляться более жесткие требования по ограничению числа и времени пребывания ЖДЦ на подъездных путях.

Чтобы УСЖДЦ удовлетворял данным требованиям, время слива расчетного железнодорожного наливного транспорта, время ожидания подачи под слив, а также его количество, ожидающее подачи под слив на подъездных путях, должны быть не более директивно установленных с вероятностью не ниже заданной.

Таким образом, для обеспечения соответствия МПСГ оперативно-тыловому назначению по приему-отгрузке горючего железнодорожным транспортом их УСЖДЦ должны с высокой доверительной вероятностью обеспечивать:

- установленную пропускную способность;
- нормативное время слива (подачи) расчетного транспорта;
- минимальное количество и время простоя транспортов на подъездных путях.

Все перечисленные требования должны быть заданы численно, включая значения доверительных вероятностей.

Для обоснования параметров УСЖДЦ, как и УМВГ, целесообразно воспользоваться математической моделью процесса на базе ТМО, позволяющей учесть все оперативно-тыловые ограничения. Формализованное описание математической модели процесса функционирования УСЖДЦ аналогично описанию модели УМВГ [9], поэтому расчет основных параметров при соответствующей интерпретации может быть выполнен по тем же зависимостям (13)–(22).

Что касается средств перекачки, то их производительность, состав и количество на складе должны обеспечивать возможность выполнения всех технологических операций с учетом случайного характера процессов, надежности технических средств и выполнения стоящих задач в установленные сроки с вероятностью не ниже заданной, при минимальной потребности в обслуживающем персонале.

В качестве средств перекачки на МПСГ должны применяться перекачивающие станции горючего (ПСГ) на автомобильном базовом шасси повышенной проходимости. В связи с высокой вероятностью одновременной работы УМВГ и УСЖДЦ в составе каждого технологического модуля МПСГ должно быть не менее двух образцов ПСГ, подача которых гарантированно обеспечит выполнение заданных нормативов по сливу (наливу) ЖДЦ и АЦ, а напор – необходимое рассредоточение основных объектов склада на местности.

Для такого рассредоточения, обеспечения приема и подачи горючего на УМВГ и УСЖДЦ, а также возможности перекачек горючего между резервуарными группами в состав технологического модуля включается блок-модуль трубопроводов на основе плосковорачиваемых рукавов.

Напор, развиваемый существующими и перспективными ПСГ, как правило, не превышает 120 м столба перекачиваемой жидкости, что позволяет осуществлять перекачку с подачей $180 \text{ м}^3/\text{ч}$ при диаметре трубопровода 100 мм на расстояние до 200 м, а при диаметре 150 мм – до 1000 м. В этой связи, возможности рассредоточения объектов МПСГ на местности существенно зависят от диаметра используемых плосковорачиваемых рукавов.

В интересах повышения пожарной безопасности и живучести основные объекты МПСГ на местности должны размещаться рассредоточено, что влечет за собой возрастание гидравлических потерь и потребности в технологических трубопроводах. При этом, с одной стороны, размещение особо важных объектов склада должно исключать или существенно снижать вероятность их уничтожения одним ударом обычных средств поражения противника, а с другой, в интересах лучших условий управления и организации защиты, охраны и обороны – должно быть достаточно компактным. Комплексу этих требований в наибольшей степени отвечает круговое размещение объектов, способствующее упрощению технологических схем перекачки горючего между модулями за счет соединения, при необходимости, их манифольдов короткими рукавами.

Вариант кругового размещения МПСГ из пяти технологических модулей на местности, оснащенный плосковорачиваемыми рукавами диаметром 150 мм и длиной по 200 м, представлен на рис. 5.

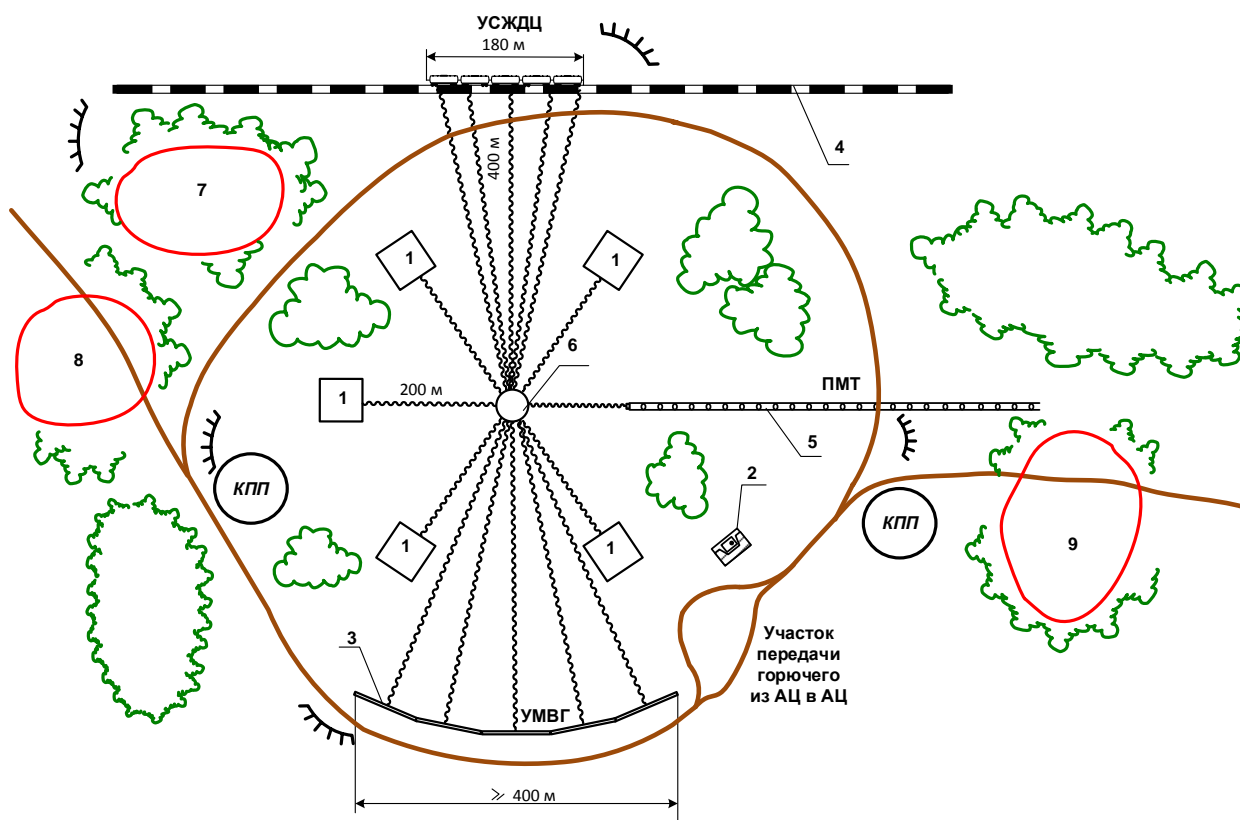


Рис. 5. Вариант кругового размещения МПСГ:

- 1 – группа резервуаров; 2 – площадка тарных ГСМ; 3 – УМВГ; 4 – УСЖДЦ;
 5 – узел подключения трубопровода; 6 – манифольд; 7 – техническая зона;
 8 – район сбора колонн; 9 – район ожидания

Возможности отечественных предприятий-производителей плоскостворачиваемых рукавов по длине ограничены 200 м, а ряд доступных диаметров рукавов включает образцы 100 мм и 150 мм [1]. При использовании в качестве технологических трубопроводов рукавов диаметром 150 мм фактическое расстояние между резервуарными блок-модулями при их круговом расположении составит около 200 м, а максимальное расстояние перекачки не превысит 800 м. При использовании рукавов диаметром 100 мм, круговое расположение блок-модулей резервуаров обуславливает длину участков технологических трубопроводов от основных объектов до манифольда не более 100 м. Тогда расстояние между резервуарными группами не менее 200 м будет обеспечено при числе блок-модулей резервуаров в комплекте МПСГ не более 3.

В случае применения рукавов диаметром 100 мм решение проблемы рассредоточенного развертывания нескольких технологических модулей достигается с использованием линейной схемы размещения МПСГ на местности (максимально широко вдоль железнодорожных путей), обеспечивая удаление УМВГ и УСЖДЦ от резервуарных групп хранения горючего на расстояние до 200 м. Однако при этом возрастает риск уничтожения всех запасов на складе с одного захода на цель самолета или вертолета. Кроме того, в случаях развертывания всех технологических модулей (до 5) значительно растягивается фронт слива (налива) автомобильных подразделений подвоза горючего. На рис. 6 представлен компактный вариант линейного размещения МПСГ.

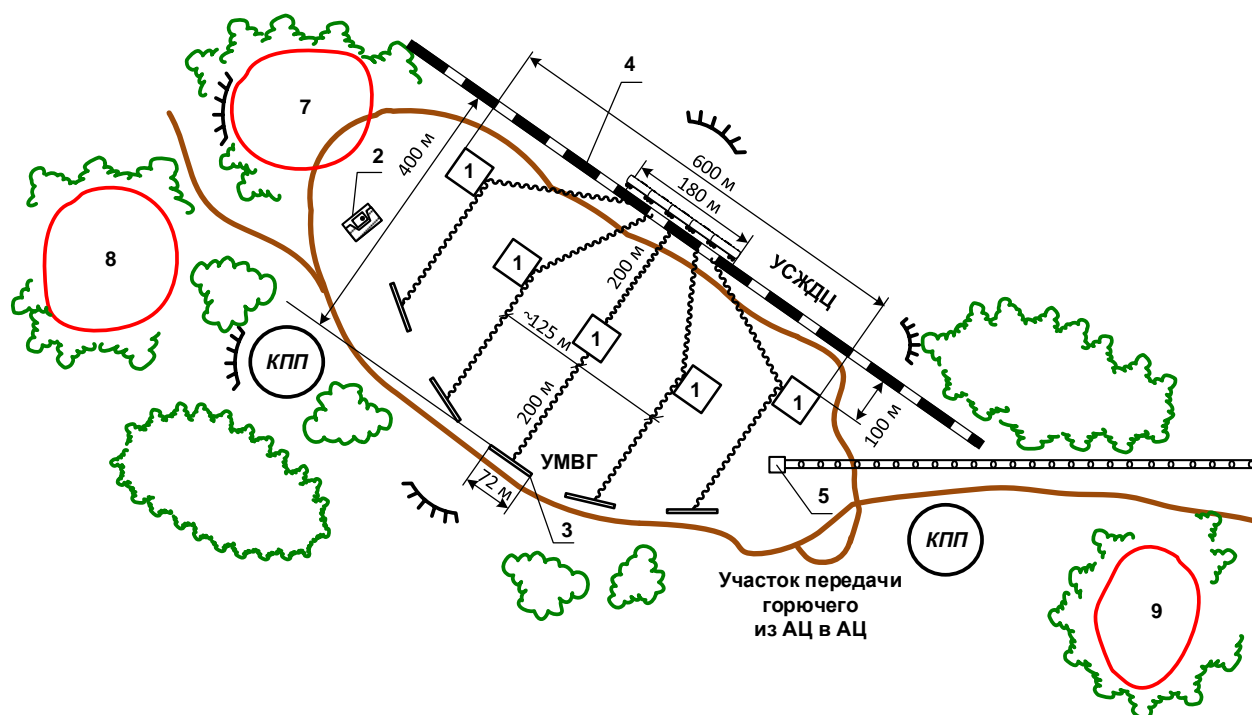


Рис. 6. Вариант линейного размещения МПСГ (5 технологических модулей):
 1 – группа резервуаров; 2 – площадка тарных ГСМ; 3 – УМВГ; 4 – УСЖДЦ;
 5 – узел подключения трубопровода; 6 – манифольд; 7 – техническая зона;
 8 – район сбора колонн; 9 – район ожидания

В каждом конкретном случае размещение основных объектов МПСГ на местности должно определяться числом развертываемых технологических модулей, наличием автомобильных и железнодорожных подъездных путей. В общем случае должна предусматриваться возможность использования всех видов транспорта (автомобильного, железнодорожного и трубопроводного) и полного развертывания склада (до 5 технологических модулей).

Кроме собственно горючего на МПСГ должно содержаться необходимое количество масел, смазок и специальных жидкостей, потребность в которых может достигать 6 % от расхода горючего, что в расчете на один технологический модуль составит до 72 м³. В современных условиях поставку масел и смазок на МПСГ целесообразно осуществлять в мелкой потребительской таре (исходя из потребности образцов вооружения, военной и специальной техники) с хранением в стандартных контейнерах. В таких же контейнерах, кроме средств перекачки, должно храниться и перевозиться оборудование технологических модулей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на основе системного подхода к структуре и составу разработана концепция создания перспективных МПСГ, заключающаяся в компоновке полевых складов базовым модулем и автономными технологическими модулями с оптимизированными параметрами вместимости и пропускной способности, содержащими блок-модули различного назначения. Данный подход соответствует оперативно-тыловым требованиям к устойчивости обеспечения горючим оперативных и оперативно-стратегических группировок войск в современных операциях. Обоснованная с использованием математических моделей процессов применения концепция МПСГ может служить научно-методической базой создания высоко мобильных блочно-модульных объектов с оптимальными тактико-техническими характеристиками основных систем, гибко адаптирующихся к потребностям обеспечиваемых объединений различного состава.

Список используемых источников

1. 70 лет Государственному научно-исследовательскому институту химмотологии Министерства обороны Российской Федерации: ист. очерк / под общ. ред. В. В. Середы. – М.: изд-во «Перо», 2016. – 648 с.
2. Руководство по работе войсковых складов горючего, полевых складов горючего, объектов и средств заправки горючим вооружения и военной техники: приказ Министра обороны РФ № 1465 от 26 декабря 2020 г. – М.: ОАО «12 Центральная типография», 2020. – 35 с.
3. Анализ опыта применения автомобильных средств заправки общевойскового назначения и оценка их соответствия современным требованиям назначения / Ю. Н. Пирогов [и др.] // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. – 2017. – № 4. – С. 115–121.
4. Совершенствование технического оснащения и организационно-штатной структуры отдельной роты заправки горючим / В. А. Виноградов [и др.] // Вопросы оборонной техники. Сер. 16: Технические средства противодействия терроризму. – 2021. – № 7-8. – С. 163–169.
5. Полевые склады горючего на базе эластичных резервуаров // Экспозиция. Нефть. Газ. – 2017. – № 2 (55). – С. 114–115.
6. Рыбаков Ю. Н., Волгин С. Н. Анализ возможности использования современных эластомерных материалов для технических средств полевого склада горючего // Труды 25 ГосНИИ МО РФ. – 2016. – Вып. 57. – С. 375–380.
7. О реализации планов (программ) строительства и развития Вооруженных Сил Российской Федерации, других войск, воинских формирований, органов и модернизации оборонно-промышленного комплекса: Указ Президента РФ № 603 от 07 мая 2012 года // Собрание законодательства Российской Федерации: бюл. – 2012. – № 19. – С. 5871–5872 [ст. 2340].
8. Березницкий А. А., Лысенко П. А., Марченков С. А. Факторы, влияющие на массовую выдачу горючего со стационарных складов горючего центров материально-технического обес-

печения // Вопросы образования и науки: теоретический и методический аспекты: сб. науч. тр. по материалам Международной научно-практической конф. – Тамбов, 2015. – С. 31–34.

9. *Пирогов Ю. Н., Шарыкин Ф. Е.* Математические модели процессов применения технических средств службы горючего // Имитационное моделирование. Теория и практика: десятая всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности (ИММОД-2021): тр. конф. – СПб., 2021. – С. 352–356.

10. *Бабенков В. И., Топоров А. В., Мокроусов А. С.* Военно-экономическое обоснование рациональных параметров поставок и оснащения полевых складов горючего для материально-технического обеспечения войск (сил) // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. – 2020. – № 1. – С. 24–30.

11. *Максимова Н. Н., Сергамасова О. И.* Теория систем массового обслуживания и ее приложения // Вестник Амурского государственного университета. Сер.: Естественные и экономические науки. – 2012. – № 59. – С. 17–25.

12. *Бобков С. П.* Подходы к моделированию систем массового обслуживания // Известия вузов. Сер.: Экономика, финансы и управление производством. – 2021. – № 49. – С. 130–134.

13. Справочник офицера службы горючего / под ред. генерал-лейтенанта-инженера И. Н. Базанова. – М.: Воениздат, 1980. – 375 с.

А. П. Данелян,
кандидат военных наук, доцент;
О. Э. Каминский,
кандидат военных наук, доцент;
А. В. Сенченко

МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ ВЫБОРА МЕСТ РАЗМЕЩЕНИЯ ЗАПАСА КОСМИЧЕСКИХ СРЕДСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА

В статье на основе предложенной методики обоснования выбора мест размещения запаса космических средств с использованием кластеризации объектов и трехуровневой системы хранения рассмотрена возможность реализации задачи по выведению заданного количества космических аппаратов в кратчайшие сроки за счет своевременной поставки составных частей РКН к точкам пуска.

Ключевые слова: кластеризация объектов, точки пуска ракет космического назначения, запас космических средств, система хранения запаса космических средств.

ВВЕДЕНИЕ

Обустройство космического пространства в военных целях имеет очень важную особенность, которая заключается в том, что превосходство в нем является основой доминирования на Земле. Именно поэтому в настоящее время активно проводятся испытания перспективных средств, обеспечивающих преждевременный вывод из строя как функциональной бортовой аппаратуры, так и космического аппарата (КА) противника в целом.

Однако при определенных обстоятельствах может возникнуть ситуация, при которой запуск новых КА будет дешевле, чем их уничтожение даже при условии, когда одно перспективное средство сможет уничтожить несколько КА противника. Преимущество будет у той стороны, которая сможет не только наладить дешевое производство, но и обеспечит заданные сроки проведения запусков КА в любых складывающихся условиях обстановки.

Одной из ярко выраженных тенденций на рынке пусковых услуг в настоящее время наряду со значительным уменьшением массы полезной нагрузки является интенсивность проведения запусков [1]. Это позволяет в кратчайшие сроки сформировать необходимую баллистическую структуру орбитальной группировки космических аппаратов для информационного обеспечения войск, которое в конечном итоге может определить превосходство одной из воюющих сторон. В условиях расширения номенклатуры средств выведения полезной нагрузки, наряду с уменьшением массогабаритных характеристик головной части ракеты космического назначения (РКН) при сохранении качества работы бортовой специальной аппаратуры относительно «тяжелых» КА, появилась возможность проводить запуски без жесткой привязки к инфраструктуре только испытательного космодрома [2].

С началом ведения военных действий и в период, предшествующий им, большое значение приобретут вопросы своевременного обеспечения разнородными ресурсами, необходимыми для решения задач проведения запусков КА. Существующие решения по организации процесса подготовки РКН, учитывающие особенности хранения и транспортировки ее составных частей, не всегда рациональны с точки зрения размещения запаса космических средств, особенно в условиях резкого изменения обстановки вследствие действий противника. Проблемой является невозможность адекватного реагирования на динамично изменяющуюся обстановку (огневое поражение объектов наземной инфраструктуры космодрома и РКН на активном участке траектории ее полета, возникновение кризисной или чрезвычайной ситуа-

ции в месте подготовки РКН к запуску и др.) с точки зрения совершения маневра запасом космических средств, обеспечивающим своевременные запуски КА с разных точек старта, которые расположены на территории нашей страны. Кроме того, вследствие хранения запаса космических средств на различных площадках (территория космодрома, предприятия-изготовители, база хранения) может возникнуть ситуация, при которой задача своевременной поставки всех составных частей РКН станет трудновыполнимой.

ОБОСНОВАНИЕ ТРЕХУРОВНЕВОЙ СИСТЕМЫ ХРАНЕНИЯ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕЙ ВЫБОР МЕСТ РАЗМЕЩЕНИЯ ЗАПАСА КОСМИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

Из-за крупных габаритов составных частей РКН основной сетью, обеспечивающей подвоз запаса космических средств до места проведения работ по подготовке и пуску является железнодорожная транспортная сеть. Сам процесс поставки необходимых элементов РКН в места подготовки и проведения запуска КА является растянутым по времени и в сложных условиях обстановки будет затруднен вследствие вполне вероятного разрушения (повреждения) железнодорожной транспортной сети при воздействии по ней противника, а также загруженности железнодорожных магистралей критически важными грузами в период подготовки (ведения) военных действий.

Хранение всего запаса космических средств на территории космодрома, обеспечивающего необходимый темп проведения пусков РКН, создаст предпосылки к его общему уничтожению. Это объясняется существующими возможностями по вскрытию мест хранения запаса и применению высокоточных средств поражения противником. Решение проблемы путем размещения запаса космических средств в базе хранения не даст положительных результатов не только из-за указанных выше обстоятельств, но и деградации железнодорожной транспортной сети в сложных условиях обстановки. Таким образом, необходимо обосновать выбор мест хранения запаса космических средств, которые бы позволили, с одной стороны, обеспечить подготовку и пуск РКН с различных точек старта в заданные сроки, а с другой – выполнить требования по рассредоточению запаса космических средств при ухудшении обстановки.

Основное направление решения данной задачи заключается в создании трехуровневой системы хранения (в составе упорядоченно распределенных центров и пунктов хранения), обеспечивающей поставки необходимых составных частей РКН в заданные районы подготовки и пуска в кратчайшие сроки, а также рациональное размещение запаса космических средств между элементами предлагаемой системы хранения.

Первый уровень системы хранения включает в себя все места хранения запаса космических средств, расположенные на различных площадках, второй уровень представляет собой совокупность пунктов хранения, к которым привязаны все места хранения запаса, а третий уровень – это совокупность центров хранения, выполняющих накопительно-распределительные функции, к которым привязаны подмножества пунктов хранения (рис. 1).

В предложенной системе хранения решается задача выбора мест размещения объектов хранения при заданных координатах точек старта, объемах хранения запаса и существующей системе железнодорожного сообщения, содержащей инфраструктуру, где возможно создание пунктов и центров хранения космических средств.

В качестве критерия оптимизации системы хранения выступают общие временные затраты на поставку составных частей РКН к месту подготовки (пуска) и стоимость создания новых объектов ее инфраструктуры. Поскольку объемы хранения запаса космических средств ограничены возможностями формирования запуска КА, то оптимизация будет заключаться в сокращении расстояний при поставке запаса космических средств к центрам хранения и от них к местам подготовки (пуска) РКН.

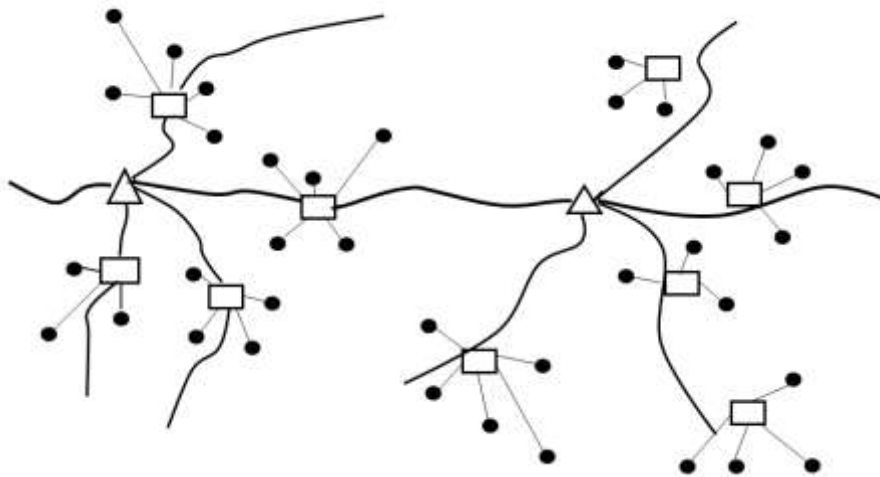


Рис. 1. Трехуровневая система хранения
(точками обозначены места хранения запаса КСр на различных площадках;
прямоугольниками – пункты хранения; треугольниками – центры хранения)

Решение задачи нахождения минимального расстояния от каждой совокупности точек до центра на плоскости возможно тогда, когда координаты этих точек известны. В первой итерации решения задачи уменьшения расстояний между совокупностью (множеством) точек и их центрами на плоскости очевиден определенный перебор вариантов множеств точек, что в последующем трансформируется к определению оптимального размещения исходных мест хранения запаса космических средств по отношению к их центрам на плоскости.

В целях реализации рационального варианта выбора мест расположения пунктов и центров хранения космических средств предлагается производить иерархическое деление каждого множества объектов в соответствии с заданными свойствами. Подобное деление можно проводить посредством кластерного анализа [3].

Минимальные расстояния между точками старта и центрами хранения гарантируют оперативность (своевременность) доставки к месту пуска составных частей РКН, а с учетом возможности размещения всего необходимого объема запаса космических средств в центрах хранения облегчают создание логистических схем и резервирования (при необходимости) поставок необходимых элементов РКН.

Преимуществом кластерного анализа является возможность производить иерархическое деление объектов системы хранения по целому спектру параметров. С помощью разработанных классических аппаратно-программных средств на базе кластерного анализа предлагается решать задачи иерархического деления объектов системы хранения запаса космических средств не только в масштабе федеральных округов но и всей страны в целом.

В ходе решения задачи оптимального размещения пунктов и центров хранения с помощью предложенного подхода возникли затруднения, разрешение которых привело к усовершенствованию самого метода кластерного анализа.

Так, применив предложенный подход, используя стандартный алгоритм *k-means*, можно найти оптимальное расположение центра в произвольной точке пространства при заданных параметрах, определяющих положение объектов системы хранения запаса космических средств. При выборе параметров, определяющих координаты точек старта, центр будет находиться в произвольной точке, которая не позволит реализовать требования по размещению запаса космических средств. С точки зрения выполнения требований по размещению запаса космических средств очевидно размещение центра в одной из точек инфраструктуры системы хранения, т. е. в непосредственной близости с железнодорожной сетью, обеспечивающей сохранность космических средств при нанесении ударов противником.

С учетом вышесказанного для рационального определения местоположения объектов системы хранения запаса космических средств необходимо решать задачу иерархического деления «с проекцией на функцию» [3], когда центр обязательно располагается на железнодорожных магистралях, или с «проекцией на точки» [3], когда центр «привязан» к железнодорожной станции.

МЕТОДИКА КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА, ОБЕСПЕЧИВАЮЩАЯ РАЦИОНАЛЬНОЕ РАЗМЕЩЕНИЕ ПУНКТОВ И ЦЕНТРОВ ХРАНЕНИЯ

Входными данными методики являются:

– множество, включающее все объекты системы хранения запаса космических средств, которые находятся на различных площадках и образуют кластеры относительно элементов предлагаемой системы хранения, $X = \{x_1, \dots, x_n\}$;

– возможное подмножество проекций $Z = \{z_1, \dots, z_p\}$.

Каждый j -й объект и каждая точка-проекция в подмножестве Z задаются G -мерным пространством R^G , т. е. $x_j = (x_{j1}, \dots, x_{jG})$ и $z_r = (z_{r1}, \dots, z_{rG})$.

Число кластеров k является единственным задаваемым значением, при этом множество X разбивается на подмножества $S = \{S_1, \dots, S_k\}$. В результате чего мы получаем несмещенное разбиение подмножеств $S^* = \{S_1^*, \dots, S_k^*\}$, центры которых являются рациональным множеством проекций $C^* \subseteq Z$.

Введем следующие обозначения:

n – количество объектов, образованных с помощью кластерного анализа;

p – количество точек возможного подмножества проекций;

i, i' – номер кластера;

j – номер объекта;

r – номер точки подмножества проекций;

l – номер координат точки;

m – номер текущей операции;

G – размерность пространства, в котором выполняется процедура кластеризации.

Длина отрезка, соединяющего точки в G -мерном пространстве определяется по евклидовой метрике, где t_1 и t_2 – две произвольные точки пространства R^G :

$$d(t_1, t_2) = \sqrt{\sum_{l=1}^G (t_{1l} - t_{2l})^2}.$$

Методика кластеризации объектов с проекцией на множество точек состоит в следующем.

1. Проведем начальное разбиение $S^0 = \{S_1^0, \dots, S_k^0\}$:

$$S_i^0 = \{X_{i1}^0, \dots, X_{in}^0\}, \cup_i^k S_i^0 = X, S_i^0 \cap S_{i'}^0 = \emptyset, i \neq i'.$$

2. Построим m -е разбиение $S^m = \{S_1^m, \dots, S_k^m\}$.

3. Определим последовательность векторов средних $E^0 = \{e_1^m, \dots, e_k^m\}$:

$$e_i^m = \{e_{i1}^m, \dots, e_{iG}^m\},$$

где $e_{il}^m = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} v_j x_{jl}}{\sum_{j=1}^{n_i} v_j}$;

n_i – количество точек i -го кластера.

4. Сформируем совокупность проекций средних для проводимого разбиения:

$$C^m = \left\{ y \in X : \forall i, d^*(x, e_i^m) = \min_{1 \leq r \leq p} d(x, e_r^m) \right\}.$$

5. Определим минимальное интервальное разбиение, которое сформирует множество C^m , и рассмотрим его как множество $S^{m+1} = (S_1^{m+1}, \dots, S_k^{m+1})$:

$$S_i^{m+1} = \left\{ x \in X: d(x, c_i^m) = \min_{1 \leq i \leq k} d(x, c_i^m) \right\}, 1 \leq i \leq k.$$

6. При условии $S^{m+1} \neq S^m$ переходим к п. 2, изменив m на $m+1$, при $S^{m+1} = S^m$ полагаем $S^m = S^*$, $C^m = C^*$ и завершаем вычисления.

Так как на последовательности разбиений S^0, S^1, \dots, S^m , функциональный характер этих разбиений $F(S)$:

$$F(S^0) = F(S) = \sum_{i=1}^k \sum_{x \in S^i} \|X - e_i(S)\|^2$$

не растет (причем $F(S^m) = F(S^{m+1})$, при условии $S^m = S^{m+1}$), то для произвольного начального разбиения S^0 процедура вычисления через определенное конечное число итераций заканчивает работу. Сложность проведения вычислений можно оценить как $O(nkm)$, где n – количество объектов подлежащих кластеризации; k – число кластеров, m – число итераций.

Начальное разбиение $S^0 = \{S_1^0, \dots, S_k^0\}$ производится методом экспертных оценок с последующим ранжированием (каждому элементу множества задается его координаты x и y), затем выбирается первый элемент (начальный центр кластера).

В целях проверки работоспособности предложенной последовательности расчетов и получения значений, определяющих характер зависимостей, изменялся параметр ϵ^0 . Это позволило получить совокупность результатов, а после проведения процедуры их усреднения – построить графики.

Разработанная методика применялась для определения оптимального выбора мест расположения центров и пунктов хранения запаса космических средств при известных координатах совокупности точек старта, мест хранения космических средств на различных площадках и железнодорожных станций одного из федеральных округов. Множество железнодорожных станций было определено сетью из семи магистральных железных дорог.

При сравнении результатов показателей качества иерархического деления при использовании классического метода *k-meins* и предложенной методики «кластеризации с проекцией» установлено, что в первом случае расположение центров хранения производится только с учетом сведений о месторасположении объектов (точек) и критерия оптимальной кластеризации D . Данный подход кластерного анализа можно назвать классическим.

В разработанной методике любой центр хранения обязательно должен находиться на железнодорожном полотне, что является дополнительным требованием при реализации процедуры кластерного анализа. Учитывая это требование, получим другой вариант реализации кластерного анализа размещения объектов с проекцией на железнодорожные магистрали и отличное от предыдущего значение критерия D .

Для классического метода *k-meins*

$$D = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n d(x_j, e_i), \quad d(x_j, e_i) = \sqrt{(x_{j1} - e_{i1})^2 + (x_{j2} - e_{i2})^2}.$$

Для предложенной методики

$$D_{\text{пр}} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n d(x_j, c_i^*), \quad d(x_j, c_i^*) = \sqrt{(x_{j1} - c_{i1}^*)^2 + (x_{j2} - c_{i2}^*)^2}.$$

На рис. 2 отображены зависимости D и $D_{\text{пр}}$ (в км) от числа кластеров для одного из вариантов расположения объектов системы хранения на выбранной железнодорожной магистрали. Из представленной характеристики видно, что общее расстояние в области графика с небольшим количеством объектов кластерного анализа интенсивно уменьшается, а при увеличении числа кластеров изменяется слабо.

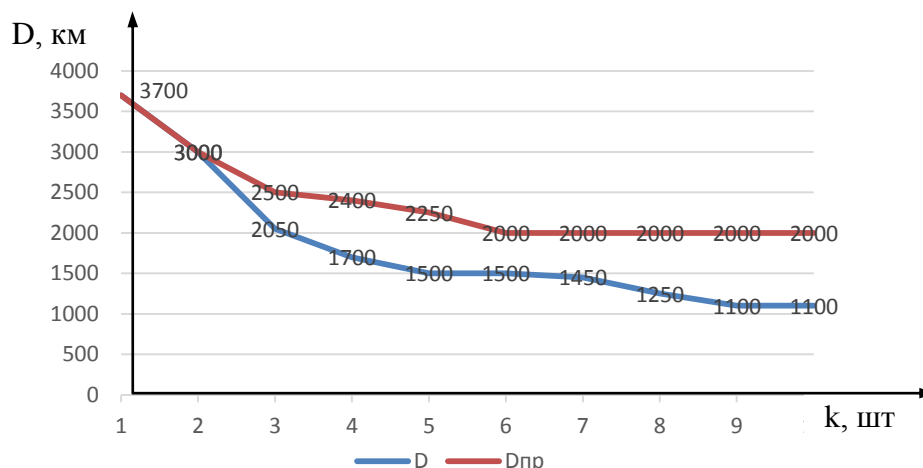


Рис. 2. Зависимость рациональности кластерного анализа D от числа кластеров k

Нахождение оптимального местоположения центров хранения предлагается проводить на основе иерархического деления с проекцией, где в качестве исходных данных используются координаты, полученные с помощью аппаратно-программных средств точек-пунктов хранения.

Для наглядной демонстрации полученных результатов в процессе нахождения оптимальных мест размещения центров хранения был взят за основу полученный вариант расположения пунктов системы хранения запаса космических средств для k равного десяти по критерию минимизации временных затрат на перевозку необходимых объемов запаса космических средств.

Характеристика общего расстояния подвоза запаса космических средств D (в км) между центрами хранения и точками старта представлена на рис. 3. Из приведенной характеристики можно констатировать, что тенденция, направленная на уменьшение общего расстояния подвоза запаса космических средств с увеличением числа кластеров замедляется. В результате оптимальным является выбор в пользу трех-четырех центров хранения.

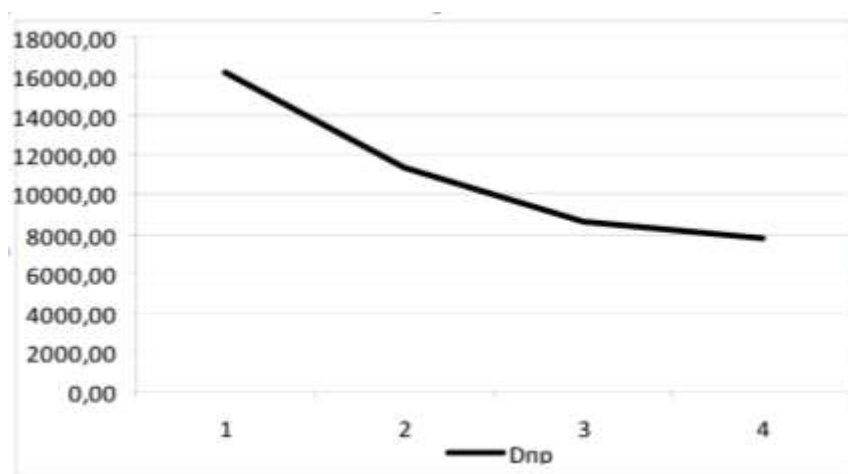


Рис. 3. Графическая зависимость общего расстояния подвоза запаса КСр от центров хранения до точек старта

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью предложенной методики выбора мест размещения запаса космических средств и обеспечивающей ее функционирование системы хранения возможна реализация графика проведения запусков КА в необходимом темпе с заданных точек на территории определенного федерального округа или страны в целом.

Кроме того, после определения места размещения запаса космических средств с использованием средств кластерного анализа с привязкой к железнодорожной инфраструктуре решается задача по выполнению требования рассредоточения запаса космических средств при проведении запусков КА в сложный период обстановки.

Список используемых источников

1. Список запусков ракеты-носителя Falcon 9. – URL: [www. ru.m.wikipedia.org](http://www.ru.m.wikipedia.org) (дата обращения: 01.07.2022).
2. Атарициков А. Н., Данелян А. П., Новиков В. А. Способ развертывания космического сегмента национальной системы мониторинга обстановки в Арктике // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2021. – Вып. 677. – С. 279–286.
3. Алгоритм кластеризации с проекцией для решения задач оптимизации размещения транспортных объектов / Б. А. Есипов [и др.] // Вестник Самарского университета. – 2017. – Т. 16, № 4. – С. 108–117.

Golyakov A. D., Sasunkevich A. A., Fominov I. V. Algorithm for estimation of parameters of motion of a non-cooperative spacecraft centre of mass relative to a service space robot based on processing of onboard measurement information // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 684. – P. 7–15.

The paper presents results of estimation of motion parameters of a non-cooperative spacecraft relative to a service space robot based on measurements of elements of the radius vector - range and orientation angles. The results of numerical simulation are presented, which allow estimating errors of the motion parameter vector elements of the non-cooperative spacecraft, taking into account the accepted assumptions about the zero error of determination of the service spacecraft centre of mass motion parameters and stationary errors of onboard sensors, depending on the initial values of a priori navigation information about the motion parameters of the non-cooperative spacecraft and the duration of the navigation mode.

Key words: non-cooperative spacecraft, service space robot, onboard instruments, motion parameters, least-squares method.

The method of determining the ballistic structure clusters of small spacecraft on circular orbits / V. I. Gorbulin, A. Y. Kovalenko, A. V. Kulvits, A. A. Skoptsov // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 684. – P. 16–25.

The orbital construction of a cluster of three satellites located in circular orbits of equal height and the same inclination and performing a common objective task of joint monitoring of specified areas of the Earth's surface (for example, spatial stereo photography) is being investigated. The condition of simultaneous functioning of the target equipment of satellites determines the requirement for the parameters of the ballistic structure of the cluster such that when solving target tasks, the satellites are located at a relatively small distance from each other. A method for determining the ballistic structure of small spacecraft in circular orbits has been developed. The use of the concept of pseudo equator and its properties allowed us to obtain analytical relations and significantly reduce both the dimension of the optimization problem under consideration and reduce the time interval for finding its solution.

Key words: space system, small spacecraft, ballistic structure, cluster, pseudo-equator.

Evteev A. V., Maltsev G. N. Determination absence of offset order tracking delay and phase meters a noise-like phase-manipulated signal in a satellite radio line synchronization system // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 684. – P. 26–37.

The dynamics of changes in the parameters of a noise-like phase-manipulated signal received in a satellite radio line is analyzed. A methodical approach to determining the absence of offset order tracking delay and phase meters synchronization system receiving radio electronic system satellite radio line is described. A comparative analysis of synchronization systems with absence of offset second and third order is carried out. The use of a second-order tracking delay meter and a phase tracking meter with a controlled structure, including the second or third order of offset absence, depending on the conditions of signal reception and the synchronization stage, in satellite radio lines in communication with low-orbit spacecraft is justified.

Key words: noise-like phase-manipulated signal, tracking meters, delay and phase tracking, synchronization system, absence of offset, controlled structure.

Kuzmenko G. A., Pimenov V. F., Popov A. S. Evaluation of the influence of interference correlation on the degree of their suppression in the adaptive howells-applebaum antenna array //

Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 684. – P. 38–51.

The article presents the results of a computational experiment to study the degree of influence of the correlation dependence between the signal and interference on the characteristics of optimal spatial selection in a linear equidistant antenna array with an adaptive interference compensator according to the Howells-Applebaum scheme. Significant differences in the shape of the radiation pattern, level diagrams and performance indicators of the adaptive antenna array compared to the standard one are shown, depending on the direction of interference arrival and the magnitude of the correlation between the signal and the interference. The dynamics of changes in the signal/interference ratio at the output of the adaptive antenna array from the value of the correlation coefficient, the difference between the angles of arrival of the signal and interference, the parameters of the signal-interference situation leading to an unacceptable decrease in the efficiency of the spatial filter are analyzed.

Key words: adaptive antenna array, interference compensation in the antenna array, correlated interference, vector of weighting coefficients, Howells-Applebaum algorithm.

The method of calculating tender values of the second derivatives geopotential using digital models of the representation Earth's gravitational field by a number of spherical functions / V. F. Alekseev, P. S. Goncharov, A. N. Zueva, D. V. Sergeev // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 684. – P. 52–61.

The article proposes a method for calculating the components of the tensor of the second derivatives of the geopotential using modern models of the decomposition of the Earth's gravitational field in a series of spherical functions. The equations for calculating the second derivatives in the spatial spherical coordinate system and the spatial rectangular coordinate system are given. The results of calculations using the proposed methodology are compared with estimates of the second derivatives of the geopotential obtained from the materials of processing observations of the GOCE satellite.

Key words: geopotential, Earth's gravitational field, tensor of the second derivatives of the gravity potential, coordinate system.

Alekhin S. G., Ivanov R. D., Shemelov V. A. A method for constructing predictive equations for determining the height of the lower boundary of cloudiness based on semi-empirical dependencies // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. - SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 684. – P. 62–68.

Estimates of the justification of forecasts of the height of the lower limit of cloudiness using semi-empirical dependencies on the example of the district of St. Petersburg are obtained. The method of adaptation of these dependencies to the new geographical area is considered. According to the results of numerical experiments, time periods within the calendar year are indicated when the prognostic equations give satisfactory results.

Key words: height of the lower boundary of cloudiness, semi-empirical methods, forecast of meteorological conditions.

A method for constructing digital terrain models based on the equalization of elevation matrices obtained from optical-electronic stereo mapping and radar interferometry, involving information about the anomalies of Earth's gravitational field / V. F. Alekseev, A. V. Astapovich, K. K. Zhbanov, D. O. Medyannikov // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 684. – P. 69–83.

A method for constructing digital terrain models in the system of normal heights is proposed, based on the combined processing of topogeodetic information obtained from optical stereo

photography and radar interferometry from remote sensing of the Earth space-based with the involvement of information about undulations of the height anomaly.

The main stages of the method implementation are described. The classification of the relief is carried out based on the analysis of its statistical characteristics, the optimal step of discretization of relief models is calculated depending on degree of terrain roughness. The requirements for the source data are defined. The possibility of using spatial phototriangulation points as reference points for interferometric processing of radar images is substantiated. It is theoretically proved that the proposed approach to the joint processing of optical stereo imaging and radar interferometry data allows to increasing the accuracy of determining heights by up to 30%, relative to only one shooting method.

Key words: remote sensing, digital terrain models, normal height, optical-electronic stereo mapping, radar interferometry, least square method, equalization of elevation matrices.

An approach to determining the thematic proximity of texts / D. N. Biryukov, G. A. Bodunov, A. S. Dudkin, V. V. Telbukh // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 684. – P. 84–93.

The article discusses various types of text corpus conversion algorithms, describes text clustering algorithms, analyzes and compares various combinations of algorithms, from which the best pair is selected based on test results.

Key words: clustering of text documents; "bag of words" model; statistical models; terminology extraction; thematic modeling; vector representation of documents; machine learning.

Andrushkevich D. V., Biryukov D. N., Timashov P. V. Approach to reducing the number of computer attacks on information infrastructure facilities based on the replacement of operational system fingerprints // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 684. – P. 94–112.

A description of the approbation of the approach to reduce the share of computer attacks, and, accordingly, the risks associated with their successful implementation, is presented. The approach under consideration is based on the idea of misleading the attacker as to which operating system is installed on the potentially attacked object of the information infrastructure.

Key words: computer attack, operating system, network traffic, network traffic modification, information security.

Biryukov D. N., Dudkin A. S., Zacharov O. O. Method of testing information security tools based on the use of multivariate source code generation according to a given functional specification // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 684. – P. 113–122.

The application of source code generation for testing information security tools is considered. Approaches for automating the creation of software are analyzed and a new approach is proposed that takes into account the specifics of developing prototypes of software modules applicable for testing information security tools. On the basis of the proposed approach, a solution was implemented that showed operability in laboratory conditions.

Key words: information protection, malicious software, computer attacks, source code generation, information security.

Lesnyak D. A., Mal'scev G. N., Matveev S. A. Methodological approach to the analysis of the stability of symmetric cryptographic algorithms // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 684. – P. 123–134.

A methodological approach to the analysis of the stability of symmetric cryptographic algorithms based on the evaluation of the computational complexity of their cryptanalysis is

presented and focused on the use in maintaining the security of information in information and telecommunications systems based on the prediction of its changes and periodic changes in the parameters of the cryptographic algorithm used. Computational complexity is considered in relation to the methods of directional enumeration of encryption keys, which are the main ones in cryptanalysis of symmetric cryptographic algorithms. The features of determining the number of iteration operations, which determines the average time to overcome protection during cryptanalysis, are considered. An example of using an estimate of the average time to overcome protection when managing the change of long-term encryption keys to maintain the required level of information security is presented.

Key words: symmetric cryptographic algorithms, cryptanalysis, computational complexity, encryption key management.

Abdurakhimov A. A., Duga V. V., Poluyan M. M. Calculation of the limit values of temperature and pressure of a two-phase medium in the hydraulic circuit of the spacecraft thermal control system during its depressurization // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 684. – P. 135–141.

In connection with the increase in the number of man-made objects, the probability of a violation of the tightness of the liquid circuit of the thermal control system of the spacecraft significantly increases. The presented article describes the results of modeling two cases that describe the maximum achievable values of pressure and temperature in the pipelines of the thermal control system of a typical spacecraft.

The simulation resulted in the conclusion that it is impossible to achieve the resulting saturated vapor pressure in the connecting tubes, which can break the tightness of the thermal control system lines and affect the performance of the spacecraft as a whole.

Key words. Spacecraft, thermal control system, malfunction, thermal conductivity, thermal control system with a liquid circuit.

Agishev S. V., Lebedev E. L. The method of assessing the impact of the reliability of monitoring and diagnosing the technical condition of the onboard equipment of spacecraft // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 684. – P. 142–146.

The processes of functioning of the spacecraft preparation subsystem (technological operation) are analyzed, since the evaluation of the effectiveness of spacecraft preparation as a whole (taking into account a wide variety of factors) can be carried out by having models for evaluating individual technological operations.

Key words: measuring instrument, stochastic network, errors of the first and second kind, onboard equipment, reliability, plausibility.

Antropova A. V., Kozlov V. V., Stel'mach S. F. Models of structures of components of electromechanical drives providing systems of small spacecraft // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 684. – P. 147–157.

The main provisions of the mathematical model of the structures of electromechanical drives of the supporting systems of small spacecraft are presented, which allows to describe the possible emergence and development of emergency situations to justify the decisions made to control the electromechanical drives of the supporting systems of small spacecraft that are in abnormal states.

Key words: electromechanical drive, small spacecraft, modeling, emergency situation, structure, operation.

Method for determining the metrological characteristics of electronic total stations in the field / A. V. Astapovich, D. A. Kunichkin, S. N. Pechnikov, A. V. Prokofjev // Proceedings of the Military

Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 684. – P. 158–166.

The article substantiates a method for determining the metrological characteristics of electronic total stations, which allows directly at the measurement object to identify the magnitude of the constant systematic error of angle measurements, evaluate the accuracy of the results obtained and present materials for processing angles at the station in the form of a number of equivalent independent directions. Simple and convenient formulas for calculating the metrological characteristics of measurements in an upgraded way in all combinations of horizontal angles at the point of the geodetic network are given, and the results of experimental verification are also presented.

Key words: horizontal angle, metrological characteristics, systematic error, methods of measuring horizontal angles, measurement accuracy, electronic total station.

Belyakov A. A., Shulepov A. I. Variant method of design mass-envelope parameters choosing for high orbiting spacecraft // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 684. – P. 167–174.

In the article the problem of choosing of design mass-envelope parameters of high orbiting spacecraft having regard to active shelf life is revealed. Satellite component density increasing variation method has been offered that allows to describe the model of design parameters changing during engineering and receive their evolution picture. Also, built-in concept transformation topic is provided with example for the spacecraft.

Key words: spacecraft, orbital satellite constellation, missile warning system, component density, ballistic constant, active shelf life, design parameters, built-in concept, envelope, mass.

Belyankin A. V., Petukhov A. I., Sultanov A. E. Influence of space head part layout on frequencies and shapes of longitudinal vibrations of the launch vehicle body // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 684. – P. 175–181.

The article discusses typical dynamic schemes of a payload launched into orbit by launch vehicles. On the basis of mathematical modeling of the natural longitudinal vibrations of the body of space rockets, the influence of the type of the dynamic scheme of the spacecraft and the upper stage on the spectral composition of low-frequency vibration is shown. An explanation is given on the role of the rigidity of fixing massive elements in the design of spacecraft on the distortion of the vibration modes of the carrier rocket body in relation to various stages of its operation. The possible influence of distortions of the body vibration modes on the level of the dynamic stability margin is noted.

Key words: longitudinal vibrations, launch vehicle, space warhead, longitudinal vibration modes.

Bogatov L. E., Lebedev E. L., Repin A. O. Application of the acoustic emission method for control of bearing assembly of power gyroscopes // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 684. – P. 182–188.

The resource of ball-bearing bearings of power gyroscopes (SG, gyrodins) largely depends on the effectiveness of methods for controlling the amount of adjustment of the axial and radial clearances and the information content of the measuring instruments used for this.

This article presents the results of an experimental study of controlling the adjustment of these values using the acoustic emission (AE) method of non-destructive testing, which has significant advantages over other control methods.

Key words: resource, power gyroscope, axial load, ball bearing, assembly technology, acoustic emission, diagnosis of bearing defects.

Boldyrev K. B., Karchin A. Y. Improvement of energomass characteristics of rockets with a saved first stage by application of the rocket fuel overflow system // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 684. – P. 189–193.

The article presents the results of the study of the dependence of the energy and mass characteristics on the parameters of the system of overflow of propellant components between the tanks in the launch vehicles of the heavy class with the first-stage salvage rocket units using a parallel layout scheme.

Key words: launch vehicle, rocket-dynamic rescue system, payload, propellant overflow.

Vlasov V. A., Gorbulin V. I., Radionov N. V. Determining the orbit of a space object in the central gravitational field by measuring three successive directions to it from a moving observation point (the problem of space navigation – the Gauss problem) // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 684. – P. 194–200.

One of the methods of celestial mechanics in the two-body problem is considered. Within the framework of the problem of calculating the orbits of space objects from three observations (the problem of space navigation – the Gauss problem), a new result was obtained for the case of circular and near-circular orbits in a purely algebraic form.

Key words: Gauss problem, search for an initial approximation, analytical solution, calculations of orbits of space objects, circular and near-circular orbits.

Voronin A. E., Peshekhonov N. E., Rybakov V. V. Conceptual model of reliability management of power supply systems of important facilities // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 684. – P. 201–209.

The principles of a systematic approach to the study of the reliability of power supply systems of important facilities are considered and specified. The basics of the concept of reliability management of power supply systems are presented. A mathematical apparatus for solving problems at the top level of the hierarchy of reliability management of power supply systems of important objects is proposed, which can be used in conditions of limited available data on reliability, and on the basis of obtaining patterns of failures of systems of important objects during their operation.

Key words: reliability of the power supply system, principles of the system approach, the concept of reliability management.

Gorshkov L. K., Lebedev E. L., Rummyantsev K. V. Model of the stress-strain state of the metal lining of the Flues of the launch complex // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 684. – P. 210–217.

The paper presents a feature of the functioning of the metal lining of the flues of the launch complexes of space launch vehicles, which consists in the presence of plastic deformations that occur in its structural material under conditions of intense heating during rocket launch. Determining the values of plastic deformations is an important element in assessing the residual life of these structures. However, the use of direct or indirect measurements of the values of plastic deformations is difficult. A mathematical model is proposed that makes it possible to perform calculations of plastic deformations, while taking into account changes in the strength characteristics of the structural material under conditions of its heating (for example, steel 3), stress relaxation. conditions of mechanical constraint of the structure, temperature gradient.

Key words: thermocyclic load, mechanical constraint, plastic deformation, stress deviator, strain tensor.

Goryanskiy A. S., Karytko A. A., Karytko E. S. The method of classification of angular measurements of the parameters of the trajectories of space objects on the basis of fragments of the light function // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 684. – P. 218–223.

The results of studying the capabilities of a classifier based on a one-dimensional convolutional artificial neural network used to solve the problem of distribution (classification) of optical angular measurements of the trajectory parameters of newly launched or newly formed space objects formed by optical means of monitoring near-Earth space are presented. The architecture of the neural network that implements the classifier is proposed, and a computational experiment is conducted to evaluate the quality of the results of the classifier.

Key words: light function of a space object, one-dimensional convolutional artificial neural network, angular optical measurements.

Kalugin Yu. B., Spilnik Yu. A. Methodology of formation of the structure and composition of the recovery train // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 684. – P. 224–233.

The article considers the solution of the problem of forming the structure and composition of a recovery train for the elimination of railway track destruction using the method of branches and boundaries. As a result, variants of the train were formed according to the selected optimality criteria.

Key words: restoration of railways, railway track, restoration train, method of branches and borders.

Krupskiy K. A., Radionov N. V., Ratushnyak A. I. Methodology for ensuring the convergence of the solution of the Lambert equation in determining the orbits of space objects in two dimensions // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 684. – P. 234–239.

In the problems of determining orbits from two measured positions of a space object, the problem of ensuring the convergence of the iterative procedure for solving the Lambert equation by choosing the initial approximation is considered. As one of the possible approaches to the theoretical substantiation of the choice of the initial approximation in iterative procedures, it is proposed to obtain an analytical solution of the simplified Lambert equation based on the expansion of functions in a series.

Key words: Lambert equation, search for an initial approximation, analytical solution, convergence of an iterative procedure.

Kukushkin I. O., Lizan V. M., Pushkarev A. A. Evaluation of degree of criticality of failures of elements of complex technical system of space rocket system // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 684. – P. 240–246.

The results of the study on evaluation of the degree of criticality of failures of elements of complex technical systems of the space rocket system are presented. The algorithm of calculation of this indicator with incomplete information about elements is described. A methodology has been developed to take into account the contribution of individual subsystems with a different number of elements to the safety of equipment operation.

Key words: space rocket system, complex technical system, failure criticality, malfunction.

Kukushkin I. O., Sofin A. P., Fedorova L. A. Modeling of the plane motion of an amoeboid type device // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 684. – P. 247–255.

The results of a study on modeling the plane motion of a device using an amoeboid method of movement are presented. The principles of creating conditions for the movement of an amoeboid-type device are described. A mathematical model of the plane motion of the device is presented. An example of using the model to determine the modes of motion depending on the magnitude of the active force under specified application conditions is shown.

Key words: amoeboid, force, moment, speed, model, device, parameters, design, robot. construction, robot.

Lisickii V. V., Martynov A. M. The concept of adaptive situational synthesis of system structures for the operation of complex technical systems // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 684. – P. 256–264.

The article presents the scientific and methodological foundations of the synthesis of complex technical systems for military purposes in the form of the concept of adaptive situational synthesis of the structures of the system of operation of complex technical systems.

Key words: complex technical system, adaptive situational management, synthesis of structures of the system of operation of complex technical systems.

Milyaev I. K., Tarasov A. G. An approach to analyzing the effectiveness of information support for automated control systems of the cosmodrome // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 684. – P. 265–273.

Automated complexes within the system of information on the technical state of space vehicles are used at the stage of collecting, processing and transmitting information, and the stage of direct analysis of the results of processing information on the technical state and effectiveness of the target tasks is performed almost manually. The paper proposes the concept of building an automated information processing system based on a unified information space.

Key words: technical condition monitoring, unified information space, data integration, economic efficiency.

Inozemtseva L. A., Kuzhekin N. S. Acmeological invariants in the structure of professional competence of a teacher of a military educational institution // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 684. – P. 274–278.

The publication discusses the actual problems of the formation of acmeological invariants as a key component of the professional competence of a teaching staff of a military educational institution, one of the options for preparing graduates of the adjunct course for pedagogical activity is proposed in the context of the a change in the approach to the training of scientific and scientific-pedagogical personnel in the adjunct course.

Key words: professional competence, acmeological invariants, professional improvement, professional retraining, professional development, pedagogical culture.

Kanivets N. V., Kruk V. M. The interrelation of indicators of psychological training of military personnel of duty shift of the communications control post with psychological conditions of improvement // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 684. – P. 279–283.

An analysis of the relationship between the indicators of the psychological preparation of the personnel of the communications control point in the activities of officials with the psychological conditions for its improvement was carried out. Inconsistencies in the official activities of officials of management bodies of formations and military units, as well as authorized officials (psychologists) to improve the system psychological training of duty shifts of communication

control points were revealed, in connection with which the indicators of psychological training do not have positive dynamics.

Key words: psychological conditions, evaluation of psychological training, officials, has estimated the average value, situationally-activity component, the cognitive component, motivational-volitional component, serial dynamic method of assessment, peer review method.

Kostarev S .V., Ostroumova J. S., Khanin S. D. Model of training military specialists for scientific and technological activities // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 684. – P. 284–293.

A model of a didactic system for training military specialists for scientific and technological activities is proposed and substantiated, which includes: goal-setting, principles for the formation of the content and construction of the educational process, training strategies, its main content lines, forms and methods of training, criteria base and procedures for assessing educational results. On the example of training military communications engineers, the possibilities of implementing this model as a guide to updating educational programs, including the development and implementation of new disciplines, revealing the scientific foundations and content of modern professionally significant technologies, are revealed.

Key words: didactic system, principles of implementation in a military engineering institute, teaching strategies, organizational forms of training, pedagogical technologies.

Kostarev S .V., Ostroumova J. S., Khanin S. D. Growth points in training military engineers for scientific and technological activities // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 684. – P. 294–303.

The reserves in training in a military engineering university for scientific and technological activities in its broader understanding, including the use of science-intensive military technologies and high-tech weapons, are determined and, taking into account the psychological and pedagogical laws, professional development and experience in the application of advanced educational practices. Based on the existing experience of updating the content, organizational forms and resource provision of the educational process, the necessary conditions for the effectiveness in the use of these reserves are formulated.

Key words: content and methodology of scientific and technological activities, improving training in a military engineering institute, educational resources.

Kuzhekin N. S., Myshko V. V., Chikurov V. A. Actual problems of military students progress monitoring system functioning in military university // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 684. – P. 304–309.

It is seemed the system of academic performance control as a set of forms of current control of students' academic performance. Forms established by the thematic plan and selected by the teacher are analyzed. The special place of boundary control in the academic performance system of current control of is emphasized.

Key words: learning result, verification form, verification technology.

Selikhina N. V., Slusarev M. N. Methodology for assessing special conditions of military service according to the degree of danger for its use in the procedure for establishing a monthly allowance to military pay // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 684. – P. 310–316.

The article considers the methodological apparatus used in the procedure of evaluation of special conditions of military service with the purpose of substantiation of correct assignment of monthly payment to servicemen of contractual service, which takes into account medical and physiological aspects influencing the emotional state of a military man in different conditions of environment.

Key words: special conditions of military service, list of military positions, methodology, physiological state of organism, classes of special conditions, integral index, criterion, score, combat post map.

Improvement of the process of maintenance of concrete constructors of special structures of launch complexes / A. I. Avseenko, D. N. Prishchepa, A. M. Sycheva, M. A. Yanchuk // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 684. – P. 317–324.

The paper shows that improving the technical condition of concrete structures of launch complex-es is possible by treating them with special impregnating compounds, which leads to a reduction in the time of repair and restoration work and inter-launch deadlines. The absorption of various im-pregnating compositions based on sols is possible due to the spontaneous rise of liquids along the ca-pillary-porous structure of the tone. Methods of saturation of concrete with impregnating compounds (sols) in the entire volume to increase its strength are considered. Methods of intensification of im-pregnation due to the influence of electric fields, ultrasound energy and other types of influences on colloidal solutions are proposed. An algorithm for applying the intensification of impregnation of building structures of launch complexes has been developed.

Key words: concrete, impregnation, experiment, method, electric current.

Volotkovich D. A., Kucherenko I. V., Mishchenko A. V. Optimization of antenna mast structures based on energy criterion // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 684. – P. 325–333.

A method for energy optimization of the mast system parameters taking into account prestressed tension cable is presented. The main ratios, including the physical dependencies for a layered-heterogeneous mast shaft, are presented in relative dimensionless values. As a result, the formulation of the optimization problem for the desired system configuration parameters is fulfilled regardless of the absolute values of the overall dimensions, loads and the system rigidity. The criterion of minimum potential deformation energy of the system is used as an optimality criterion. The variable parameters are the distances between the attachment points of the tension cable tiers. A numerical calculation of a two-tier system is performed. The optimal values of the attachment points coordinates of prestressed tension cable are found.

Key words: heterogeneous mast, multi-tiered tension cable, optimal design, energy criterion.

Determination of the coefficient of temperature linear expansion of heat-resistant foam concrete for use in gas duct structures of launch facilities / V. O. Golovchinskiy, Yu. A. Kamenev, S. S. Ryabova, A. S. Solomachin, A. M. Sycheva // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 684. – P. 334–341.

The article discusses and analyzes the results of the study of the coefficient of temperature linear expansion at different temperatures and heating rates of samples of refractory foam concrete, as well as its holding time. The average density class of refractory foam concrete is D700. It is shown that during the first heating cycle, the coefficient of temperature linear expansion of refractory foam concrete has a negative value.

Key words: refractory foam concrete, coefficient of temperature linear expansion, nuclear power.

The concept of the modular structure of mobile field fuel depots / Y. N. Pirogov, A. V. Popov, G. R. Samarina, F. E. Sharykin // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 684. – P. 342–353.

On the basis of a modular approach to the structure and composition, the concept of creating promising mobile field fuel depots is substantiated and developed. Requirements are formulated and

proposals are made for the technical equipment of field fuel storage facilities of variable capacity. The variants of their adaptation to the size of operational stocks and the average daily cargo turnover are considered in accordance with the need for the expenditure of a military grouping consisting of up to a combined arms (tank) army with forces and means of reinforcement.

Key words: field fuel storage, concept, modular structure, autonomy, mathematical modeling, cargo turnover, technical equipment.

Danelyan A. P., Kaminsky O. E., Senchenko A. V. Methodology for substantiating the choice of locations for the stock of space assets using cluster analysis // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 684. – P. 354–360.

In the article, based on the proposed methodology for justifying the choice of locations for the stock of space assets using clustering of objects and a three-level storage system, the possibility of implementing the task of launching a given number of spacecraft in the shortest possible time due to the timely delivery of ILV components to launch points is considered.

Key words: object clustering, launch points for space rockets, stock of space assets, space asset storage system.

Абдурахимов Алексей Александрович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 758-93-63, e-mail: vka@mil.ru

Авсеенко Александр Иванович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-44, e-mail: vka@mil.ru

Агишев Сергей Валинурович, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Алексеев Виктор Фёдорович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 217-03-39, e-mail: vka@mil.ru

Алёхин Сергей Григорьевич, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13), тел.: 8 (812) 327-96-56, e-mail: vka@mil.ru

Андрушкевич Дарья Владимировна, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-87, e-mail: vka@mil.ru

Антропова Александра Владимировна, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Астапович Анатолий Владимирович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-42, e-mail: vka@mil.ru

Беляков Андрей Алексеевич, Самарский научный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва (443086, Россия, Самара, ул. Московское шоссе, 34); тел.: 8 (987) 917-49-82, e-mail: jake.dunn@inbox.ru

Белянкин Александр Васильевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 273-62-84, e-mail: vka@mil.ru

Бирюков Денис Николаевич, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-87, e-mail: vka@mil.ru

Богатов Леонид Евгеньевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-99-11.

Бодунов Георгий Алексеевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 297-75-95.

Болдырев Константин Борисович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 997-75-95, e-mail: vka@mil.ru

Власов Вячеслав Александрович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-22, e-mail: vka@mil.ru

Волоткович Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, доцент; Новосибирское высшее военное командное ордена Жукова училище (630117, Россия, Новосибирск, ул. Иванова, 49); тел.: 8 (923) 112-12-89, e-mail: dvolotkovich@mail.ru

Воронин Алексей Евгеньевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 023-30-88, e-mail: vka@mil.ru

Головчинский Владимир Орестович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (921) 581-97-09, e-mail: vka@mil.ru

Голяков Алексей Дмитриевич, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-21.

Гончаров Павел Сергеевич, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 175-45-53, e-mail: vka@mil.ru

Горбулин Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-89, e-mail: vka@mil.ru

Горшков Лев Капитонович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-89, e-mail: vka@mil.ru

Горянский Александр Сергеевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Данелян Александр Петрович, кандидат военных наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-43, e-mail: vka@mil.ru

Дуга Вадим Вадимович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (967) 433-64-27, e-mail: vka@mil.ru

Дудкин Андрей Сергеевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 297-75-95, e-mail: vka@mil.ru

Евтеев Андрей Владимирович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-32, e-mail: vka@mil.ru

Жбанов Константин Константинович, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (929) 115-47-71, e-mail: vka@mil.ru

Захаров Олег Олегович, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-87, e-mail: vka@mil.ru

Зуева Анастасия Николаевна, кандидат технических наук; 27 Центральный научно-исследовательский институт МО РФ (123007, Москва, 1-й Хорошевский проезд, 5); e-mail: 27cnii@mil.ru

Иванов Роман Дмитриевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13), тел.: 8 (812) 347-95-91, e-mail: vka@mil.ru

Иноземцева Людмила Александровна, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 810-62-63, e-mail: vka@mil.ru

Калугин Юрий Борисович, доктор технических наук, профессор; Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулёва (198504, Россия, Санкт-Петербург, Петергоф, ул. Суворовская, 1); тел.: 8 (965) 024-99-25, e-mail: yuri_kalugin@inbox.ru

Каменев Юрий Александрович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (981) 972-38-22, e-mail: vka@mil.ru

Каминский Олег Эдуардович, кандидат военных наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-43, e-mail: vka@mil.ru

Канивец Надежда Владимировна, Военный университет Министерства обороны Российской Федерации (125047, Россия, Москва, ул. Большая Садовая, 14), e-mail: kanivez.n@mail.ru

Карчин Александр Юрьевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 753-96-86, e-mail: vka@mil.ru

Карытко Анатолий Александрович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Карытко Екатерина Сергеевна, войсковая часть 28289 (142409, Россия, Московская обл., Ногинск-9).

Коваленко Алексей Юрьевич, доктор технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-16, e-mail: vka@mil.ru

Козлов Владимир Владимирович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Костарев Сергей Валерьевич, кандидат педагогических наук, доцент; Военная академия связи имени С. М. Будённого (194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., 3).

Крук Владимир Михайлович, заслуженный деятель науки РФ, доктор психологических наук, профессор; Военный университет Министерства обороны Российской Федерации (125047, Россия, Москва, ул. Большая Садовая, 14).

Крупский Кирилл Анатольевич, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-22, e-mail: vka@mil.ru

Кужекин Николай Сергеевич, кандидат философских наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 794-16-72, e-mail: vka@mil.ru

Кузьменко Галина Анатольевна, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 237-10-21, e-mail: vka@mil.ru

Кукушкин Игорь Олегович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (981) 190-85-14, e-mail: kio142@mail.ru

Кульвиц Алексей Владимирович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-16, e-mail: vka@mil.ru

Куничкин Дмитрий Анатольевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 342-95-76, e-mail: vka@mil.ru

Кучеренко Ирина Валерьевна, кандидат технических наук, доцент; Новосибирское высшее военное командное ордена Жукова училище (630117, Россия, Новосибирск, ул. Иванова, 49); тел.: 8 (923) 190-15-99, e-mail: kucher@ngs.ru

Лебедев Евгений Леонидович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-11, e-mail: vka@mil.ru

Лесняк Денис Александрович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-32.

Лизан Вячеслав Миронович, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-99-81, e-mail: vka@mil.ru

Лисицкий Владимир Вадимович, доктор технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-99-81, e-mail: vka@mil.ru

Мальцев Георгий Николаевич, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); 8 (812) 347-95-32, e-mail: vka@mil.ru

Мартынов Антон Михайлович, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-99-81, e-mail: vka@mil.ru

Матвеев Сергей Анатольевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-32.

Медяников Даниил Олегович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 965-57-56, e-mail: vka@mil.ru

Миляев Илья Константинович, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-26, e-mail: vka@mil.ru

Мищенко Андрей Викторович, доктор технических наук, доцент; Новосибирское высшее военное командное ордена Жукова училище (630117, Россия, Новосибирск, ул. Иванова, 49); тел.: 8 (913) 939-38-03, e-mail: mavr59@ngs.ru

Мышко Василий Васильевич, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-65, e-mail: vka@mil.ru

Остроумова Юлия Сергеевна, кандидат педагогических наук, доцент; Военная академия связи имени С. М. Будённого (194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., 3).

Петухов Антон Иванович, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (931) 541-43-49, e-mail: vka@mil.ru

Печников Сергей Николаевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Пешехонов Николай Егорович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 224-59-48, 8 (812) 347-95-44, e-mail: vka@mil.ru

Пименов Виктор Фёдорович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 237-10-21, e-mail: vka@mil.ru

Пирогов Юрий Никитич, кандидат технических наук; ФАУ «25 ГосНИИ химмотологии Минобороны России» (121467, Россия, Москва, ул. Молодогвардейская, 10); тел.: 8 (499) 141-97-03, e-mail: 22otdel@mail.ru

Полуян Максим Михайлович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 784-10-90, e-mail: vka@mil.ru

Попов Александр Владимирович, кандидат технических наук; ФАУ «25 ГосНИИ химмотологии Минобороны России» (121467, Россия, Москва, ул. Молодогвардейская, 10); тел.: 8 (499) 141-97-01, e-mail: 22otdel@mail.ru

Попов Александр Сергеевич, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 237-10-21, e-mail: vka@mil.ru

Прищепа Денис Николаевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-44, e-mail: vka@mil.ru

Прокофьев Александр Валерьевич, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 947-20-11, e-mail: vka@mil.ru

Пушкарев Андрей Александрович, войсковая часть 26178 (141107, Россия, Щелково, Московская обл.); тел.: 8 (921) 799-59-60, e-mail: pushakrevandrey@gmail.com

Радионов Николай Васильевич, доктор экономических наук, профессор, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-22, e-mail: vka@mil.ru

Ратушняк Александр Иванович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-22, e-mail: vka@mil.ru

Репин Алексей Олегович, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-99-11.

Румянцев Кирилл Владимирович, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-11, e-mail: vka@mil.ru

Рыбаков Вячеслав Вячеславович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) - 245-80-25, e-mail: vka@mil.ru

Рябова Светлана Сергеевна, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (952) 611-66-12, e-mail: vka@mil.ru

Самарина Галина Рафаиловна, ФАУ «25 ГосНИИ химмотологии Минобороны России» (121467, Россия, Москва, ул. Молодогвардейская, 10); тел.: 8 (499) 141-95-85, e-mail: 22otdel@mail.ru

Сасункевич Александр Анатольевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-21.

Селихина Наталия Викторовна, кандидат военных наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Сенченко Александр Владимирович, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-43, e-mail: vka@mil.ru

Сергеев Дмитрий Викторович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 175-45-53, e-mail: vka@mil.ru

Скопцов Алексей Андреевич, ФГБУ 27 ЦНИИ МО РФ (125284, Россия, Москва, 1-й Хорошёвский проезд, 5); тел.: 8 (812) 347-95-89, e-mail: vka@mil.ru

Слюсарев Максим Николаевич, кандидат военных наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Соломахин Андрей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Софьин Алексей Петрович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (921) 868-19-67, e-mail: vka@mil.ru

Спильник Юрий Александрович, Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулёва (199034, Санкт-Петербург, наб. Макарова, 8); тел.: 8 (906) 240-71-15, e-mail: spil87@mail.ru

Стельмах Станислав Феликсович, кандидат военных наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Султанов Алексей Эдыгарович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (921) 787-25-32, e-mail: vka@mil.ru

Сычева Анастасия Максимовна, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-44, e-mail: vka@mil.ru

Тарасов Анатолий Геннадьевич, доктор технических наук, доцент, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-26, e-mail: vka_kaf26_1@mil.ru

Тельбух Вячеслав Владимирович, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-87, e-mail: vka@mil.ru

Тимашов Павел Васильевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-87, e-mail: vka@mil.ru

Фёдорова Людмила Анатольевна, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (981) 778-50-06, e-mail: vka@mil.ru

Фоминов Иван Вячеславович, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-21.

Ханин Самуил Давидович, доктор физико-математических наук, профессор; Военная академия связи имени С. М. Будённого (194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., 3).

Чикуров Виталий Александрович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-65, e-mail: vka@mil.ru

Шарыкин Фёдор Евгеньевич, ФАУ «25 ГосНИИ химмотологии Минобороны России» (121467, Россия, Москва, ул. Молодогвардейская, 10); тел.: 8 (499) 141-97-58, e-mail: fedor_rf@mail.ru

Шемелов Владимир Александрович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-52, e-mail: vka@mil.ru

Шулепов Александр Иванович, кандидат технических наук; Самарский научный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва (443086, Россия, Самара, ул. Московское шоссе, 34); тел.: 8 (960) 809-65-20, e-mail: shulepov-al@mail.ru

Янчук Михаил Александрович, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-44, e-mail: vka@mil.ru

Абдурахимов Алексей Александрович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-12, e-mail: vka@mil.ru

Аверкиев Николай Фёдорович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-16, e-mail: vka@mil.ru

Авсеев Александр Иванович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (921) 752-29-59, e-mail: vka@mil.ru

Алексеев Виктор Фёдорович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 217-03-39.

Алёшкин Андрей Петрович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 341-95-37, e-mail: vka@mil.ru

Башкирцев Виктор Павлович, кандидат педагогических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 218-23-57.

Готюр Иван Алексеевич, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 327-96-52, e-mail: vka@mil.ru

Грибакин Владимир Александрович, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Григорьев Андрей Николаевич, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Доронин Александр Павлович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-52, e-mail: vka@mil.ru

Зима Владимир Михайлович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (921) 740-31-67, e-mail: vka@mil.ru

Козлов Владимир Владимирович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 215-00-23, e-mail: vka@mil.ru

Косырев Сергей Викторович, доктор военных наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-93, e-mail: vka@mil.ru

Кравцов Александр Николаевич, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Кунтурова Надежда Борисовна, доктор педагогических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-31, e-mail: vka@mil.ru

Лагун Андрей Валерьевич, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 937-09-02.

Мионов Андрей Николаевич, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-74, e-mail: vka@mil.ru

Назаров Андрей Вячеславович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Наумчик Игорь Васильевич, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Новиков Евгений Александрович, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 218-51-19, e-mail: vka@mil.ru

Овчаров Владимир Александрович, доктор технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-59.

Онуфрей Андрей Юрьевич, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (921) 656-51-42, e-mail: vka@mil.ru

Пилькевич Сергей Владимирович, доктор технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 955-89-00, e-mail: vka@mil.ru

Пирогов Сергей Юрьевич, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-13, e-mail: vka@mil.ru

Поспишенко Василий Иванович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Садин Дмитрий Викторович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-11, e-mail: vka@mil.ru

Салов Вячеслав Викторович, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-16, e-mail: vka@mil.ru

Сычева Анастасия Максимовна, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (921) 857-22-17, e-mail: vka@mil.ru