

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

**Выпуск 687
2023 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, проф.;
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, проф.; **И. В. Фоминов**, доктор техн. наук, проф.;
К. Ю. Цветков, доктор техн. наук, проф.; **А. В. Чарушников**, доктор воен. наук, проф.

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

Ответственный за выпуск:
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. 23.06.2023.
Формат печатного листа 445×300/4.
Уч.-печ. л. 87,00. Уч.-изд. л. 43,25
Тираж 26 экз. Заказ 4105/75.
Отпечатано в типографии Военно-космической академии
имени А. Ф. Можайского

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

- Бугайченко П. Ю., Привалов А. Е.* Модель гомеостатического управления орбитальной системой мониторинга космической обстановки 7
- Викторов Д. С., Калачников А. С., Толмачев А. А., Федер А. Л.* Метод создания параллельного специального программного обеспечения с временной параметризацией многопроцессорных вычислительных систем с однородным доступом к памяти..... 16
- Горбулин В. И., Горбулин П. В., Статкевич А. В., Фадин И. А.* Метод целочисленного программирования для решения минимаксной задачи о назначениях при автоматизированном управлении сложной организационно-технической системой 27

СВЯЗЬ, УПРАВЛЕНИЕ, НАВИГАЦИЯ И ВОЕННАЯ РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

- Володин Р. С., Комиссаров А. В., Тараканов М. Н.* Оценка потенциальной реализуемой зоны обнаружения баллистических объектов по сигналам наземных некооперируемых источников излучения 37
- Голик А. М., Дашкин Э. Р., Сергеев Д. В., Шишов Ю. А.* Система коррекции искажений амплитудно-фазового распределения поля на апертуре цифровой антенной решетки 44
- Голяков А. Д., Сасункевич А. А., Фоминов И. В.* Обоснования приборного состава и требований к показателям точности средств измерений системы автономной навигации космического робота 50
- Горбулин В. И., Матвеев А. А., Поляков С. А., Фадин И. А.* Алгоритм синтеза управления движением вокруг центра масс при взаимодействии космических аппаратов на круговых орбитах равного радиуса 61
- Моряков С. И.* Метод определения эффективной площади рассеяния объектов по результатам широкополосных измерений в ближней зоне локации на компактных полигонах 72

СБОР И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

- Алехин С. Г., Иванов Р. Д., Шемелов В. А.* Оценки эмпирических методов прогнозирования высоты нижней границы облачности для района г. Санкт-Петербург 80

Астапович А. В., Зуев А. С., Куничкин Д. А., Прокофьев А. В. Модель искажений координатного пространства СК-42 для высокоточного преобразования координат в систему ПЗ-90.11 87

Никольшин Б. Ю., Новиков А. В., Тимощук А. С. Применение метеорологических радиозондовых оболочек с подвешенной съёмочной аппаратурой 102

ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Бирюков Д. Н., Дудкин А. С., Шестаков И. А. Подход к повышению объяснимости и интерпретируемости решений, принимаемых интеллектуальной системой 112

Бирюков Д. Н., Тимахов П. В., Чернышов В. И. Метод идентификации потенциально опасных состояний конфигурации электронного документооборота с использованием ассоциативной ресурсной сети 120

Ломако А. Г., Менисов А. Б. Подход к оцениванию рисков снижения качества функционирования систем искусственного интеллекта на основе анализа ассоциаций 129

Овчаров В. А., Подшибякин А. С. Технология защиты мобильных беспроводных устройств от атак отслеживания 138

Соловьев И. А., Трофимова Н. А. Технология анализа событий и угроз информационной безопасности промышленных систем управления на основе применения модели активности атаки к данным сетевого трафика 147

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

Абдурахимов А. А., Дуга В. В., Кукушкин И. О., Полуян М. М. Концепция перебазируемых технических комплексов для подготовки к запуску сверхмалых космических аппаратов 161

Арсеньев В. Н., Ключкин А. К. Формирование требований к точностным характеристикам измерительных средств системы селекции космического аппарата, предназначенного для мониторинга космического мусора 169

Ведерников М. В., Ляшевский А. В., Прокопенко Е. А. Методический подход к оцениванию возможности эксплуатации твердотопливных двигателей с механическими дефектами 178

Иваню А. Ю., Копкин Е. В., Мышко В. В. Оценивание достоверности проверок с интервальной формой представления диагностических признаков 188

Карагодин В. В., Прищепа Д. Н., Рыбаков Д. В. Комплексный подход к определению надежности и живучести систем электроснабжения специальных объектов 199

Козлов В. В., Лагун А. В., Харченко В. А. Интегральное качество механических объектов в системе оценивания облика космического ракетного комплекса 205

Крыжановский В. И., Слатов С. В., Трофимов И. А. Алгоритм формирования управляющих воздействий для перевода управляемого объекта в заданное состояние за конечное число периодов дискретности 215

Мосягин Р. А., Тупицин Ю. Е., Шишкин Е. В. Математическая модель многокритериального выбора альтернатив восстановления работоспособности технических систем в нештатных ситуациях 226

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

Беседин С. М., Ерофеев А. В., Кацик В. О. Формирование готовности курсантов к работе в составе учебных расчетов при проведении тактико-специального учения 233

Булекбаев Д. А., Морозов А. В. К вопросу обучения обыкновенным дифференциальными уравнениям в техническом вузе 239

Гончаревский В. С. Ленинградская Краснознаменная Военно-Воздушная инженерная академия и особенности обучения в ней в конце 40-х и в начале 50-х годов XX века 249

Кужекин Н. С., Мышко В. В., Чикуров В. А. Проблемы оптимизации технологии обучения курсантов при проведении занятий по военно-специальным дисциплинам 256

ВОПРОСЫ ГУМАНИТАРНЫХ И ОБЩЕСТВЕННЫХ НАУК

Иноземцева Л. А., Кужекин Н. С. Динамика системы познавательной мотивации в процессе становления преподавателя военно-учебного заведения 262

Науменкова Е. О. Роль британской информационной машины в разжигании русофобии как средства информационной борьбы с Россией во время Русско-турецкой войны 1877–1878 годов 267

Огородников В. П. Проблема философских оснований науки 276

ВОЕННО-СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ И КОНСТРУКЦИИ

Гусев Н.Н., Кучеренко А.О., Мандрица Д.П., Маслов В.О. Экспериментальное исследование влияния параметров импульсов возбуждения вторичной аппаратуры систем мониторинга на подавление высших гармоник колебаний резонаторов струнных преобразователей 284

Каменев Ю. А., Рябова С. С., Соломахин А. С., Сычева А. М. Исследование прочностных и деформативных характеристик жаростойкого пенобетона при повышенных температурах 298

Солдатенко Т. Н., Тюрин Е. А. Методика оценивания уровня риска аварии железобетонной конструкции стартового сооружения по постоянной износа 305

ОПЕРАТИВНОЕ ИСКУССТВО И ТАКТИКА

<i>Козлов Ю. В., Кукушкин М. А., Пономарев Д. Ю.</i> Предложения по совершенствованию методики планирования применения средств управления космическими аппаратами	311
<i>Петухов А.М., Холодок А.Ю.</i> Методический подход к оцениванию управления переводом организационно-технической системы военного назначения в различные состояния при деструктивных воздействиях на ее элементы	320
Рефераты статей	327
Сведения об авторах	337
Сведения о рецензентах	344

П. Ю. Бугайченко,
кандидат военных наук;
А. Е. Привалов,
кандидат технических наук

МОДЕЛЬ ГОМЕОСТАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ОРБИТАЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ МОНИТОРИНГА КОСМИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ

В статье решается задача разработки модели гомеостатического управления орбитальной системой мониторинга космической обстановки (ОСМКО), отличающаяся возможностью управления процессом мониторинга космической обстановки на основании баланса между процессами получения и устаревания информации. Осуществлена математическая постановка задачи гомеостатического управления ОСМКО. В качестве показателя результативности функционирования ОСМКО предложена энтропия космической обстановки, а также разработан способ ее расчета. Описан процесс функционирования ОСМКО как противостояния двух антагонистических процессов – получения и устаревания информации об объектах космического мусора. Предложена модель гомеостатического управления ОСМКО в виде балансного гомеостата, обоснована структура дальнейших исследований, направленных на реализацию гомеостатического управления ОСМКО.

Ключевые слова: мониторинг космической обстановки, космический мусор, гомеостатическое управление, энтропия.

ВВЕДЕНИЕ

Современный этап освоения космического пространства столкнулся с проблемой его засорения, которая с каждым годом становится все более острой. Несмотря на множество исследований, направленных на очистку космического пространства, единственным действенным методом защиты от столкновений в космосе в настоящий момент является своевременное предупреждение об опасном сближении на основании актуальной информации об объектах космического мусора (ОКМ). Процесс получения информации об ОКМ является процессом информационного поиска, сущность которого заключается в поиске новых ОКМ и уточнении информации об уже известных. Основными потребителями информации являются организации, эксплуатирующие КА, а также автоматизированные системы, такие как автоматизированная система предупреждения об опасных ситуациях в околоземном космическом пространстве (АСПОС ОКП) Роскосмоса [1]. В состав средств получения информации о космической обстановке (КО), образованной ОКМ, могут входить наземные (в том числе морские) и орбитальные средства. Ограничения наземных средств, такие как зависимость времени получения информации от метеоусловий, времени суток и текущего положения ОКМ, делают актуальным применение орбитальной системы мониторинга космической обстановки (ОСМКО).

Информация об ОКМ в процессе мониторинга КО является результатом динамического взаимодействия двух антагонистических процессов – получения и устаревания информации. Поддержание баланса этих процессов является необходимым условием достижения цели функционирования ОСМКО. Состояние системы, при котором обеспечивается динамическое постоянство параметров системы, называется гомеостазом, а система, в которой состояние гомеостаза является нормой (в отличие от других состояний – деградации, неисправности и т. д.) – гомеостатической системой [2]. Исходя из вышесказанного, в рамках статьи принимается аксиома о принадлежности ОСМКО классу гомеостатических систем. Управление, целью которого является поддержание гомеостаза системы, называется гомеостатическим управлением, а система управления, реализующая данный тип управления – системой гомео-

статического управления. Система управления ОСМКО, целью которой является поддержание актуальности информации об ОКМ на заданном уровне, называется системой гомеостатического управления ОСМКО.

Существующие подходы к построению ОСМКО направлены на обеспечение глобальности обзора [3, 4], оперативности [5] или периодичности [6] получения информации об ОКМ. Разработанные в ходе данных исследований модели строились без учета процесса устаревания информации, который является стохастическим и зависит от факторов внутренней и внешней сред ОСМКО. В статье предложена новая модель гомеостатического управления ОСМКО, отличающаяся возможностью управления процессом мониторинга космической обстановки на основании баланса между процессами получения и устаревания информации.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ГОМЕОСТАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ОРБИТАЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ МОНИТОРИНГА КОСМИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ

Процесс мониторинга КО заключается в получении информации о параметрах орбиты ОКМ на основании измерений. Рассмотрим данный процесс с точки зрения теоретико-множественного подхода. Определим совокупность базисных множеств, на основании которых будет построена модель процесса мониторинга КО:

$$\Upsilon = \langle T, A, V, W, K, B, \Gamma, M, \Sigma_A, \Sigma_W, \Sigma_\Gamma, F_A, F_W, F_\Gamma \rangle.$$

Здесь T – непрерывное множество моментов времени, $T = [0, \infty)$;
 A – множество координат в абсолютной геоцентрической экваториальной системе координат (АГЭСК),

$$A = \{(x(t), y(t), z(t)) \in \mathbb{R}^3, t \in T\};$$

V – множество скоростей в АГЭСК,

$$V = \left\{ \left(\frac{dx(t)}{dt}, \frac{dy(t)}{dt}, \frac{dz(t)}{dt} \right) \right\};$$

W – множество параметров движения центра масс (ЦМ) орбитального объекта (КА или ОКМ) в АГЭСК,

$$W = \{w = (a, v) \mid a \in A, v \in V\};$$

K – множество кеплеровских элементов орбиты,

$$K = \{(\Omega, i, \omega, p, e, \tau)\},$$

где Ω – прямое восхождение восходящего узла орбиты, $\Omega \in [0^\circ, 360^\circ)$;

i – наклонение орбиты, $i \in [0^\circ, 180^\circ)$;

ω – аргумент широты перигея орбиты, $\omega \in [0^\circ, 180^\circ)$;

p – большая полуось орбиты, $p > 0$;

e – эксцентриситет орбиты, $e \in [0, 1]$,

τ – время прохождения перигея, $\tau \in T$;

B – множество углов ориентации оси визирования оптико-электронного комплекса (ОЭК) относительно орбитальной системы координат,

$$B = \{(\beta_1(t), \beta_2(t), \beta_3(t))\},$$

где β_1 – угол тангажа;

β_2 – угол рысканья;

- β_3 – угол крена;
- Γ – множество угловых координат центра изображения ОКМ в системе координат ОЭК,
- $$\Gamma = \{(\gamma_1(t), \gamma_2(t))\};$$
- M – множество звездных величин;
- $\Sigma_A, \Sigma_W, \Sigma_\Gamma$ – σ -алгебры множеств A , W и Γ соответственно;
- F_A, F_W, F_Γ – множества плотностей многомерных распределений вероятности на множествах A , W и Γ соответственно:

$$F_A = \left\{ f_A : p(\sigma_A) = \int_{\sigma_A} f_A(a) da \right\}, a \in A, \sigma_A \in \Sigma_A,$$

$$F_W = \left\{ f_W : p(\sigma_W) = \int_{\sigma_W} f_W(w) dw \right\}, \sigma_W \in \Sigma_W, w \in W,$$

$$F_\Gamma = \left\{ f_\Gamma : p(\sigma_\Gamma) = \int_{\sigma_\Gamma} f_\Gamma(\gamma) d\gamma \right\}, \sigma_\Gamma \in \Sigma_\Gamma, \gamma \in \Gamma,$$

где p_{σ_A} , p_{σ_W} , p_{σ_Γ} – вероятности случайных событий $a \in \sigma_A$, $w \in \sigma_W$, $\gamma \in \sigma_\Gamma$ соответственно.

Процесс мониторинга КО осуществляется во внешней среде, основными элементами которой являются Земля, Луна и Солнце. В рамках работы введем допущение об отсутствии влияния гравитационного поля других космических объектов на ОКМ, а также об отсутствии влияния других объектов на освещенность ОКМ. Таким образом, модель среды функционирования ОСМКО можно представить кортежем

$$\mathcal{M} = \langle \Psi_{Earth}, \Psi_{Moon}, \Psi_{Sun} \rangle,$$

где Ψ_{Earth} – координаты положения Земли в АГЭСК, $\Psi_{Earth} = (0, 0, 0) \in A$;

Ψ_{Moon} – модель движения Луны в АГЭСК, $\Psi_{Moon} : T \rightarrow A$;

Ψ_{Sun} – модель движения Солнца в АГЭСК, $\Psi_{Sun} : T \rightarrow A$.

Главным предназначением информации, получаемой от ОСМКО, является предупреждение опасных ситуаций в околоземном космическом пространстве (ОКП) [7]. В связи с этим мониторинг КО следует осуществлять не для всего ОКП, а для некоторой его области, в которой функционируют КА (назовем их охраняемыми КА). Модель охраняемых КА можно представить в форме кортежа

$$\mathcal{O} = \langle O, \xi_K \rangle,$$

где O – множество охраняемых КА;

ξ_K – отображение, ставящее в соответствие каждому охраняемому КА его параметры орбиты, $\xi_K : O \rightarrow K$.

Объект контроля представляет собой множество ОКМ E , в состав которого входят уже известные объекты, а также неизвестные объекты, о количестве которых имеется лишь некоторая априорная информация. К неизвестным объектам следует в первую очередь отнести некаталогизированные объекты космического мусора техногенного или природного происхождения. Априорную информацию о количестве ОКМ можно задать в форме дискретного распределения:

$$\eta_{card} : card(E) \rightarrow [0, 1].$$

Для каждого ОКМ $e \in E$ до измерения имеется некоторая априорная информация о его параметрах движения, которую предлагается задать в форме плотности 6-мерного распределения $f_W \in F_W$:

$$\eta_W : E \times T \rightarrow F_W.$$

Полное отсутствие информации о параметрах движения ОКМ можно представить в форме равномерного распределения в границах области определения множества W . Как правило, эти границы можно задать, исходя из физических ограничений на параметры движения. Таким образом, модель КО может быть представлена кортежем

$$\mathcal{E} = \langle E, \eta_{card}, \eta_W \rangle.$$

Средство контроля – ОСМКО – представляет собой множество космических аппаратов-измерителей (КАИ) C , оснащенных ОЭК. Для каждого КАИ заданы его параметры, влияющие на процесс мониторинга космического пространства. Модель ОСМКО можно представить кортежем

$$\mathcal{E} = \langle C, \varphi_K, \varphi_B, \varphi_M, \varphi_\Gamma, \varphi_F \rangle,$$

- где C – множество КАИ, входящих в ОСМКО;
- φ_K – отображение, ставящее в соответствие каждому КАИ его параметры орбиты, $\varphi_K : C \rightarrow K$;
- φ_B – отображение, ставящее в соответствие для каждого КАИ минимальное время перестроения из одного углового положения в другое, $\varphi_B : C \times B \times B \rightarrow T$;
- φ_M – отображение, ставящее в соответствие каждому КАИ максимальную звездную величину, которую может зафиксировать его ОЭК, $\varphi_M : C \rightarrow M$;
- φ_Γ – отображение, ставящее в соответствие каждому КАИ максимальные углы обзора его ОЭК, $\varphi_\Gamma : C \rightarrow \Gamma$;
- φ_F – отображение, ставящее в соответствие каждому КАИ плотность распределения ошибки измерения угловых координат ОКМ (полагается, что в данном отображении учтены все возможные ошибки, такие как инструментальная погрешность ОЭК, погрешности системы ориентации и стабилизации КА и т. д.), $\varphi_F : C \rightarrow F_\Gamma$.

Определение 1. Элементарной проверкой δ назовем измерение в момент времени t угловых координат центра изображения ОКМ $e \in E$ в поле визирования ОЭК космического аппарата-измерителя $c \in C$, сориентированного в $b \in B$. Результатом элементарной проверки является плотность распределения $f_\Gamma \in F_\Gamma$ угловых координат в поле визирования ОЭК:

$$\delta : f_\Gamma = \begin{cases} \delta(c, b, t, e), u_1 \wedge u_2 \\ none, \bar{u}_1 \vee \bar{u}_2 \end{cases}.$$

Здесь u_1 – условие соответствия направления ОЭК КАИ на ОКМ:

$$u_1 : \tilde{a}_e \in \kappa(a_c, b, \gamma_c), a_c = \lambda(\varphi_K(c), t), \gamma_c = \varphi_\Gamma(c),$$

где \tilde{a}_e – действительные координаты ОО, $\tilde{a}_e \in A$;

λ – функция, преобразующая кеплеровские элементы орбиты K в координаты АГЭСКО для заданного момента времени:

$$\lambda : a = \lambda(k, t) | a \in A, k \in K, t \in T;$$

κ – функция, ставящая в соответствие текущим координатам КА $a \in A$ и текущим углам ориентации КА $b \in B$ область пространства $\sigma_A \in \Sigma_A$, которая может наблюдаться ОЭЖ с углами обзора $\gamma \in \Gamma$:

$$\kappa: \sigma_A = \kappa(a, b, \gamma).$$

u_2 – условие соответствия расстояния между КАИ и ОКМ возможностям ОЭЖ:

$$u_2: \mu(a_{Sun}, a_{Moon}, \tilde{a}_e, a_c) \leq \varphi_M(c), a_c = \lambda(\varphi_K(c), t), a_{Sun} = \Psi_{Sun}(t), a_{Moon} = \Psi_{Moon}(t),$$

где μ – функция расчета наблюдаемой звездной величины ОКМ $m \in M$ по координатам Солнца – $a_{Sun} \in A$, Луны – $a_{Moon} \in A$, ОКМ – $a_E \in A$ и КАИ – $a_C \in A$,

$$\mu: m = \mu(a_{Sun}, a_{Moon}, a_E, a_C).$$

Обозначим множество всех элементарных проверок Δ .

Определение 2. Проверкой π параметров движения ОКМ назовем эксперимент, связанный с выполнением последовательности элементарных проверок $\Delta_\pi \subset \Delta$, обработки их результатов и объединения с априорной информацией об ОКМ $\mathcal{E}^- \in \mathcal{E}$:

$$\pi: \mathcal{E}^+ = \pi(\mathcal{E}^-, \Delta_\pi), \Delta_\pi = \{\delta \mid \delta \in \Delta\}.$$

Результатом проверки является новая (апостериорная) информация об ОКМ $\mathcal{E}^+ \in \mathcal{E}$. Состав элементарных проверок и характеристики апостериорной информации \mathcal{E}^+ зависят от выбранного метода определения параметров движения (метода космической триангуляции, решения задачи Эйлера – Ламберта и т. д.). Обозначим множество всех проверок параметров движения ОКМ Π .

Определение 3. Программой функционирования r назовем последовательность проверок π параметров движения ОКМ:

$$r = (\pi \mid \pi \in \Pi).$$

Множество всех программ функционирования обозначим R .

Обозначим χ – показатель результативности функционирования ОСМКО. Тогда задача управления ОСМКО заключается в определении программы функционирования r^* , оптимизирующей показатель результативности функционирования:

$$r^* = \arg \underset{r \in R}{extr} (\chi(r, E, O)),$$

при ограничении на возможности перестроения КАИ: для любых двух входящих в программу r^* элементарных проверок $\delta_1(c, b_1, t_1, e_1)$ и $\delta_2(c, b_2, t_2, e_2)$ ($t_2 > t_1$) с применением одного и того же КАИ $c \in C$ потребное время перестроения с углового положения b_1 в угловое положение b_2 не должно превышать временного интервала между проверками. В математической форме условие запишется следующим образом:

$$\forall \delta_1(c, b_1, t_1, e_1), \delta_2(c, b_2, t_2, e_2) \mid \delta_1, \delta_2 \in r^*, t_2 > t_1 \Rightarrow \varphi_B(c, b_1, b_2) \leq t_2 - t_1.$$

ОБОСНОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОРБИТАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА КОСМИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ

Показатель результативности функционирования ОСМКО должен удовлетворять требованиям представительности (адекватности), полноты, критичности (чувствительности) к изменению основных факторов, содержательности (наличия ярко выраженного физического смысла), «простоты» вычислимости [8]. Данный показатель, исходя из принципа

А. Н. Колмогорова [9], выявляется на основании цели функционирования системы. Поскольку ОСМКО относится к классу информационно-поисковых систем, результативность функционирования ОСМКО, реализующей программу функционирования $r \in R$, напрямую связана с количеством информации, которая получена при реализации программы r . Физической величиной, отражающей меру количества информации, является энтропия.

Выделяют четыре формы энтропии: термодинамическую, информационную, дифференциальную и структурную. Ввиду того, что ОСМКО является многомерной стохастической системой, в качестве показателя эффективности целесообразно выбрать дифференциальную энтропию [10], которая для многомерного распределения $p(x_1, x_2, \dots, x_n)$ определяется как [11]

$$H = - \int \dots \int p(x_1, x_2, \dots, x_n) \log p(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n.$$

Если для данного ОКМ в заданный момент имеется информация

$$f_w(t) = \eta_w(e, t), e \in E, t \in T, f_w \in F_w,$$

то распределение его координат $f_A(e, t) \in F_A$

$$f_A(e, t) = g(\eta_w(e, t)),$$

где $g(\cdot)$ – функция, преобразующая плотность 6-мерного распределения параметров движения $f_w \in F_w$ в плотность 3-мерного распределения $f_A \in F_A$

$$g : f_A = g(f_w).$$

Энтропия ОКМ в данном случае составит

$$H(e, t) = - \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f_A(e, t) \log(f_A(e, t)) dx dy dz = \int_A f_A(e, t) \log(f_A(e, t)) da,$$

где $H(\cdot)$ – функция расчета дифференциальной энтропии Шеннона.

Назовем *критической* область пространства $\sigma_o \in \Sigma_A$ вокруг охраняемого КА $o \in O$, при попадании внутрь которой объекта космического мусора система управления КА не успевает принять и реализовать решение о выполнении маневра уклонения от ОКМ. Введем функцию ζ , определяющую эту область пространства для охраняемого КА:

$$\sigma_o = \zeta(o).$$

Разобьем все множество A на две области: σ_o и $\bar{\sigma}_o = A \setminus \sigma_o$. Тогда, исходя из свойства аддитивности энтропии,

$$H(e, t) = \int_A f_A(e, t) \log(f_A(e, t)) da = \int_{\sigma_o} f_A(e, t) \log(f_A(e, t)) da + \int_{A \setminus \sigma_o} f_A(e, t) \log(f_A(e, t)) da.$$

Поскольку целью функционирования ОСМКО является обеспечение информацией об ОКМ в заданных областях, показателем результативности, удовлетворяющим требованию представительности, является энтропия ОКМ $e \in E$ в критической области σ_o охраняемого КА $o \in O$:

$$H(o, e, t) = \int_{\sigma_o} f_A(e, t) \log(f_A(e, t)) da.$$

Энтропия $H(o, e, t)$ непрерывно возрастает с течением времени в соответствии с законом о возрастании энтропии замкнутой стохастической системы. Снижение $H(o, e, t)$ осуществляется при уточнении параметров движения ОКМ (т. е. выполнении проверки $\pi \in \Pi$). Таким образом, $H(o, e, t)$ является показателем гомеостатируемого свойства ОСМКО – актуальности информации, значение которого необходимо удерживать в определенных пределах:

$$H(o, e, t) \leq H_{\max}, \quad (1)$$

ограничивающих область гомеостаза. Определение границ H_{\max} осуществляется, исходя из требований к точности предоставляемой информации, а также устойчивости функционирования ОСМКО, и требуют отдельного исследования.

Примем допущение о независимости координат различных ОКМ и о независимости координат различных КА. Ввиду того, что для независимых случайных величин (X_1, X_2, \dots, X_n) справедливо равенство

$$H(X_1, X_2, \dots, X_n) = H(X_1) + H(X_2) + \dots + H(X_n),$$

энтропию КО в момент времени t можно найти по формуле

$$H_{\mathcal{G}}(t) = \sum_{o \in O} \sum_{e \in E} H(o, e, t) = \sum_{o \in O} \sum_{e \in E} \int_{\sigma_o} f_A(e, t) \log(f_A(e, t)) da.$$

Поскольку целью функционирования ОСМКО является минимизация неопределенности космической обстановки (т. е. $H_{\mathcal{G}}(t) \rightarrow \min$), показателем χ результативности управления $r \in R$ ОСМКО для данного момента времени является относительное (по сравнению с максимально возможным) снижение энтропии:

$$\chi = \frac{H_{\mathcal{G}}(t) - H_{\mathcal{G}}(t, r)}{H_{\mathcal{G}}(t)}.$$

Таким образом, задача управления ОСМКО заключается в определении для данного момента времени $t_r \in T$ программы функционирования r^* , которая при выполнении условия (1) максимизирует изменение энтропии КО:

$$r^* = \arg \max_{r \in R} \left(\frac{H_{\mathcal{G}}(t^+) - H_{\mathcal{G}}(t^+, r)}{H_{\mathcal{G}}(t^+)} \right), t^+ > t_r \quad (2)$$

где $H_{\mathcal{G}}(t^+, r)$ – прогнозная энтропия, полученная в результате выполнения программы $r \in R$;
 $H_{\mathcal{G}}(t^+)$ – прогнозная энтропия ОСМКО без выполнения измерений.

СТРУКТУРА МОДЕЛИ ГОМЕОСТАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ОРБИТАЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ МОНИТОРИНГА КОСМИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ

Модель гомеостатического управления ОСМКО (рис. 1) состоит из балансного гомеостата [12], образованного моделями антагонистических процессов устаревания информации об ОКМ \mathcal{T} и получения информации \mathcal{W} , каждая из которых образует отрицательную обратную связь для другой. Процесс измерений заключается в получении апостериорной (новой или уточненной) информации об ОКМ \mathcal{E}^+ на основании априорной информации \mathcal{E}^- и действительных координат ОКМ $\tilde{\mathcal{E}}$. Процесс осуществляется на основании программы управления r^* ОСМКО \mathcal{E} , функционирующей во внешней среде \mathcal{M} . Процесс получения информации \mathcal{W} является стохастическим ввиду наличия погрешностей измерений и случайного характера априорной информации \mathcal{E}^- , а также множества других случайных факторов, к которым относятся: ошибки навигации КАИ и ориентации КАИ в пространстве, неисправности бортовых систем КАИ и т. д. В связи с этим, характеристики точности ин-

формации \mathcal{E}^+ , полученной в процессе измерений, актуальны только на момент проведения измерений, точность прогноза с течением времени снижается. Для учета данного процесса вводится модель процесса устаревания информации, которая осуществляет прогноз \mathcal{E}^- изменения с течением времени T информации об ОКМ \mathcal{E}^+ , полученной в процессе измерений. Прогноз \mathcal{E}^- подается на вход модели антагонистического процесса в качестве модели априорной информации на текущее время.

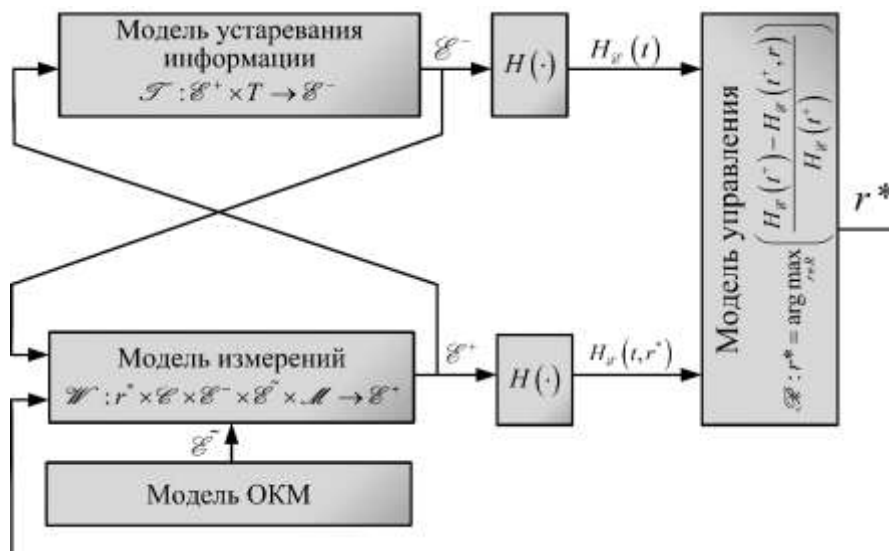


Рис. 1. Структурная схема модели гомеостатического управления ОСМКО

Выходы моделей получения и устаревания информации поступают на вход функций расчета энтропии КО $H(\cdot)$, а с их выходов – на вход модели синтеза оптимальной программы функционирования \mathcal{R} , которая на основании анализа достигнутой $H_{\mathcal{E}}(t, r^*)$ и прогнозной $H_{\mathcal{E}}(t)$ энтропий КО формирует оптимальную программу функционирования.

Разработанная на концептуальном уровне модель гомеостатического управления ОСМКО требует проведения дальнейших исследований по следующим направлениям:

- разработка модели процесса устаревания информации \mathcal{T} ;
- разработка модели процесса измерений параметров движения \mathcal{W} ;
- разработка метода оценивания энтропии КО $H(\cdot)$;
- разработка метода (методики) синтеза оптимальной программы функционирования \mathcal{R} .

Кроме того, требуется решение ряда частных задач, к числу которых относятся:

- разработка модели критической области охраняемого КА σ_o ,
- исследование устойчивости системы гомеостатического управления;
- разработка метода (методики) обоснования границ области гомеостаза H_{\max} .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нарастающее количество ОКМ является реальной угрозой дальнейшему освоению ОКП и создает предпосылки возникновения труднопрогнозируемых опасных ситуаций, способных привести к конфликтным ситуациям между участниками космической деятельности [7]. Обстановка в ОКП непрерывно изменяется, полученная информация о КО быстро теряет свою актуальность и не может быть использована для планирования предупреждения опасных си-

туаций, связанных со столкновениями функционирующих КА с ОКМ. Предложенный в статье подход к управлению ОСМКО, основанный на принципах гомеостатического управления, позволяет учесть динамику устаревания информации и обеспечить требуемую актуальность информации о КО за счет поддержания баланса между процессами получения и устаревания информации. Разработанная модель гомеостатического управления ОСМКО позволила обосновать структуру дальнейших исследований, направленных на реализацию данного подхода.

Список используемых источников

1. Проблемы оптического мониторинга космического мусора / И. Е. Молотов [и др.] // Препринты ИПМ имени М. В. Келдыша. – 2020. – № 7. – 17 с. – URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2020-7> (дата обращения: 15.03.2021).
2. *Прангишвили И. В.* Системный подход и общесистемные закономерности. – М. : СИНТЕГ, 2000. – 258 с. – (Системы и проблемы управления).
3. *Фадин И. А., Горбулин В. И., Матвеев А. А.* Модель орбитальной системы мониторинга космической обстановки, построенной на круговых орбитах равного радиуса // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – № 7. – С. 290–304.
4. Варианты баллистического построения орбитальной системы контроля космических объектов в ближней зоне околоземного космического пространства / В. К. Семинихин [и др.] // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2015. – Вып. 646. – С. 112–116.
5. *Котяшов Е. В.* Концептуально-структурная модель функционирования орбитальной системы космических аппаратов наблюдения и предупреждения опасных ситуаций на геостационарной орбите // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2020. – Вып. 672. – С. 25–32.
6. *Емельянов В. А., Рамалданов Р. П.* Принципы построения, технический облик космических средств контроля космического мусора вблизи геостационарной орбиты и показатели их целевой эффективности // Космонавтика и ракетостроение. – 2016. – № 2 (87). – С. 92–100.
7. АСПОС на страже Земли / Ю. Макаров [и др.] // Воздушно-космическая сфера. – 2016. – № 1 (86). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/aspos-na-strazhe-zemli> (дата обращения: 15.03.2021).
8. *Минаков Е. П., Шафигуллин И. Ш., Зубачев А. М.* Методы исследования эффективности применения организационно-технических систем космического назначения : учебник. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2016. – 244 с.
9. *Колмогоров А. Н.* Число попаданий при нескольких выстрелах и общие принципы оценки эффективности системы стрельбы // Труды Математического института имени В. А. Стеклова. – 1945. – Т. 12. – С. 7–25.
10. *Шеннон К. Э.* Математическая теория связи // Работы по теории информации и кибернетике / пер. С. Карпова. – М. : ИИЛ, 1963. – С. 243–333.
11. *Тырсин А. Н.* Энтропийное моделирование многомерных стохастических систем : моногр. – Воронеж : Научная книга, 2016. – 156 с.
12. *Емельянов В. В., Курейчик В. В., Курейчик В. М.* Теория и практика эволюционного моделирования. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 432 с.

Д. С. Викторов*,
доктор технических наук, профессор;

А. С. Калачников*;

А. А. Толмачев*,
кандидат военных наук;

А. Л. Федер**,
доктор военных наук, доцент

*Военная академия Воздушно-космической обороны
имени Маршала Советского Союза Г. К. Жукова, г. Тверь.

**Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург.

МЕТОД СОЗДАНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО СПЕЦИАЛЬНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ С ВРЕМЕННОЙ ПАРАМЕТРИЗАЦИЕЙ МНОГОПРОЦЕССОРНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ С ОДНОРОДНЫМ ДОСТУПОМ К ПАМЯТИ

Представлен метод создания параллельного специального программного обеспечения с временной параметризацией многопроцессорных вычислительных систем с одинаковым доступом к памяти, позволяющий из последовательных программ на языке C++ получить рациональный вариант параллельного специального программного обеспечения с временной параметризацией с учетом затрат на доработку специального программного обеспечения.

Ключевые слова: параллельное специальное программное обеспечение, временная параметризация, многопроцессорная вычислительная система с одинаковым доступом к памяти.

ВВЕДЕНИЕ

Анализ практики принятия решений должностными лицами органов военного управления на применение войск (сил) показал, что повышение оперативности и устойчивости управления становится решающим фактором в современном военном конфликте [1]. Технической основой для принятия решений и доведения их до подчиненных является информационно-управляющая система (ИУС), включающая вычислительную систему (ВС), специальное программное обеспечение (СПО) и другие элементы системы. Одним из возможных и реализуемых подходов к повышению оперативности с минимальными затратами является оптимизация СПО обработки данных ИУС и учет ограничения времени в СПО, необходимого на принятие решений [2]. Обработка данных осуществляется в основном на многопроцессорных ВС с одинаковым доступом к памяти (класс SMP). По классификации параллельных вычислительных систем (классификации Флинна) класс SMP относится к MIMD (*Multiple Instruction Stream/Multiple Data Stream*) – множественному потоку команд и множественному потоку данных [3]. Указанные обстоятельства обуславливают необходимость разработать метод создания параллельного программного обеспечения с временной параметризацией (ВП) многопроцессорных ВС с одинаковым доступом к памяти, который позволит повысить оперативность обработки данных и тем самым повысить оперативность управления должностными лицами органов военного управления. В статье под специальным программным обеспечением с временной параметризацией будем понимать часть программного обеспечения ВС с указаниями моментов времени, в которые должно начинаться выполнение различных операторов/функций, различных блоков независимых операторов, а также обмен данными и синхронизации процессов с учетом длительности их выполнения.

Анализ существующих средств и подходов к параллельному программированию показал, что не поддерживается принцип управления параллельным процессом на каждом такте работы ВС; отсутствует возможность поддержки создания параллельных программ с заданным временем выполнения; имеется большое количество итеративных алгоритмов с неизвестным заранее количеством итераций; сложно выделить независимые цепочки команд для достижения эффективного и масштабируемого решения [4].

Указанные обстоятельства позволяют сформулировать цель работы – повысить ускорение программного обеспечения ВС ИУС.

ПОСТАНОВКА НАУЧНОЙ ЗАДАЧИ

Для достижения цели необходимо разработать метод создания параллельного СПО M , позволяющий выбрать вариант V^* создания параллельного СПО в интересах повышения ускорения $\delta T(V)$ программного кода в условиях ограничений затрат $C_{\text{доп}}$ на реализацию метода:

$$M : V^* = \arg \max_{V \in V_{\text{доп}}} \delta T(V | X_{\text{ВС}}), \quad (1)$$

где M – метод создания параллельного СПО с временной параметризацией ВС;
 V^* – рациональный вариант создания параллельного СПО с временной параметризацией ВС;
 $\delta T(V)$ – показатель ускорения при реализации варианта создания параллельного СПО с временной параметризацией ВС;
 V – множество допустимых вариантов параллельного СПО с временной параметризацией ВС, при этом

$$V = \{I; N_M; K_i\},$$

где I – тип архитектуры используемого процессора;
 N_M – количество ядер в процессоре i -го типа;
 K_i – класс задачи (программы);

$X_{\text{ВС}}$ – множество учитываемых параметров архитектуры процессора ВС;

$$C(V/X_{\text{ВС}}) \leq C_{\text{доп}}, \quad (2)$$

где $C(V/X_{\text{ВС}})$ – совокупные затраты на доработку варианта создания параллельного СПО с временной параметризацией ВС;

$C_{\text{доп}}$ – располагаемые затраты на доработку СПО с ВП ВС.

Ускорение рассчитывается по выражению [3, 5]

$$\delta T(V) = \frac{T_{\text{ИСХ}}}{T_{\text{ПАР}}(V)} = \frac{T_{\text{ИСХ}}}{\sum_{b=1}^m p_b T_b}, \quad (3)$$

где $T_{\text{ИСХ}}$ – время реализации задачи с использованием исходного метода программирования;

$T_{\text{ПАР}}(V)$ – время реализации задачи с использованием предлагаемого метода программирования на n -м количестве процессоров (ядер);

m – число ветвей в программе;

p_b – вероятность реализации b -й ветви;

T_b – время реализации b -й ветви параллельного алгоритма.

Время реализации b -й ветви параллельного алгоритма рассчитывается по выражению [5]

$$T_b = \max_{P_j \in P(b)} (t_j^H + t_j), \quad (4)$$

где $P(b)$ – множество операторов b -й ветви;

$t_j^H + t_j$ – сумма момента начала и относительной длительности оператора $P_j \in P(b)$.

Исходная информация создания параллельного ПО с временной параметризацией много-процессорных вычислительных систем с одинаковым доступом к памяти должна содержать:

- последовательную программу на языке C++;
- тип и количество процессоров (ядер);
- количество, емкость и число уровней памяти;
- длительность выполнения операций (функций);
- показатели эффективности функционирования параллельного ПО;
- требования (ограничения) заказчика.

Выходная информация содержит:

- параллельную программу на языке C++;
- оценки показателей эффективности функционирования параллельного ПО;
- оценки затрат на доработку ПО с ВП.

ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Состав метода (рис. 1) включает следующие взаимосвязанные процедуры:

- усовершенствованную процедуру создания вариантов параллельного СПО с временной параметризацией ВС;
- известную процедуру расчета совокупных затрат на доработку СПО с временной параметризацией ВС;
- известную процедуру решения оптимизационной задачи выбора рационального варианта создания параллельного СПО с временной параметризацией ВС.

Усовершенствованная процедура создания вариантов параллельного СПО с временной параметризацией ВС (рис. 2) предназначена для создания параллельного СПО с временной параметризацией в зависимости от выбранных требований заказчика, а также оценки показателей эффективности ее функционирования. В отличие от известных способов распараллеливания [2, 6] новизна процедуры заключается в том, что при распараллеливании программ учитываются архитектура ВС с одинаковым доступом к памяти, ограничение доступного аппаратного ресурса N и время выполнения задачи T_3 на данном ресурсе.

Исходные данные:

- исходный код программы (задачи) на языке C++;
- параметры архитектуры X_{BC} ВС;
- количество процессоров и ядер $N_{\text{сист}}$;
- процессорные времена выполнения операций программы t_j ;
- требуемое время решения задачи и известное (варьируемое) число ядер процессора $N_{\text{зад}}$.

В процедуру входит алгоритм создания модели параллельного СПО с временной параметризацией при ограничении доступного аппаратного ресурса, который обеспечивает требуемое время T_3 решения задачи и в отличие от известных учитывает приоритеты операторов (по значениям времени выполнения операций/функций) и позволяет рассчитать очередной момент времени освобождения каждого из задействованных в момент t ядер (элементы 5–9 на рис. 2).

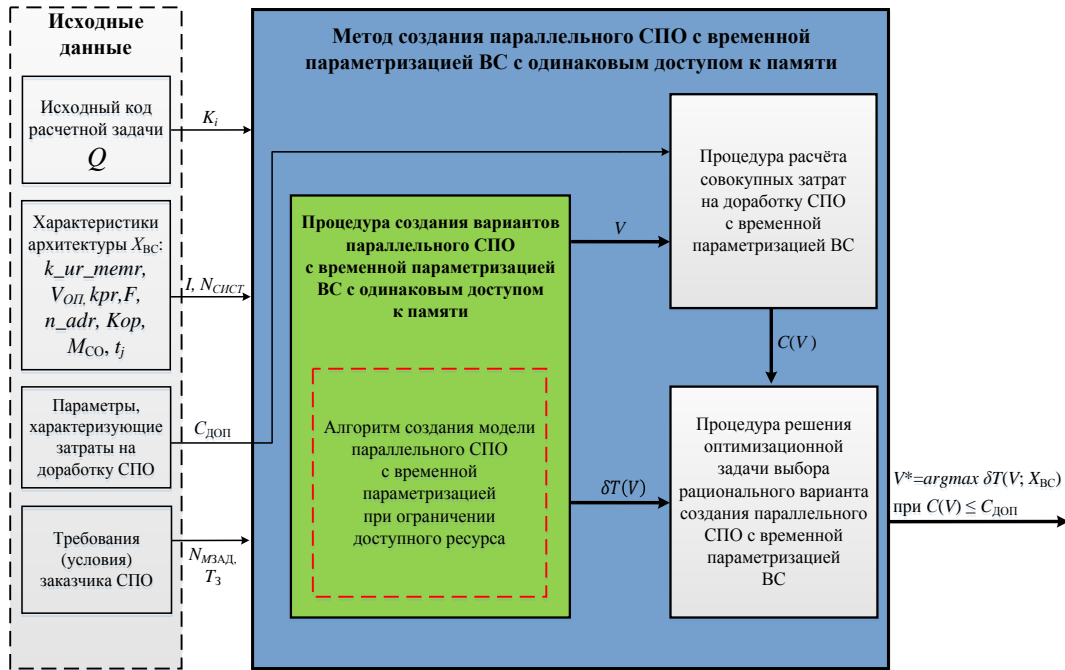


Рис. 1. Логическая организация метода создания параллельного СПО с временной параметризацией ВС

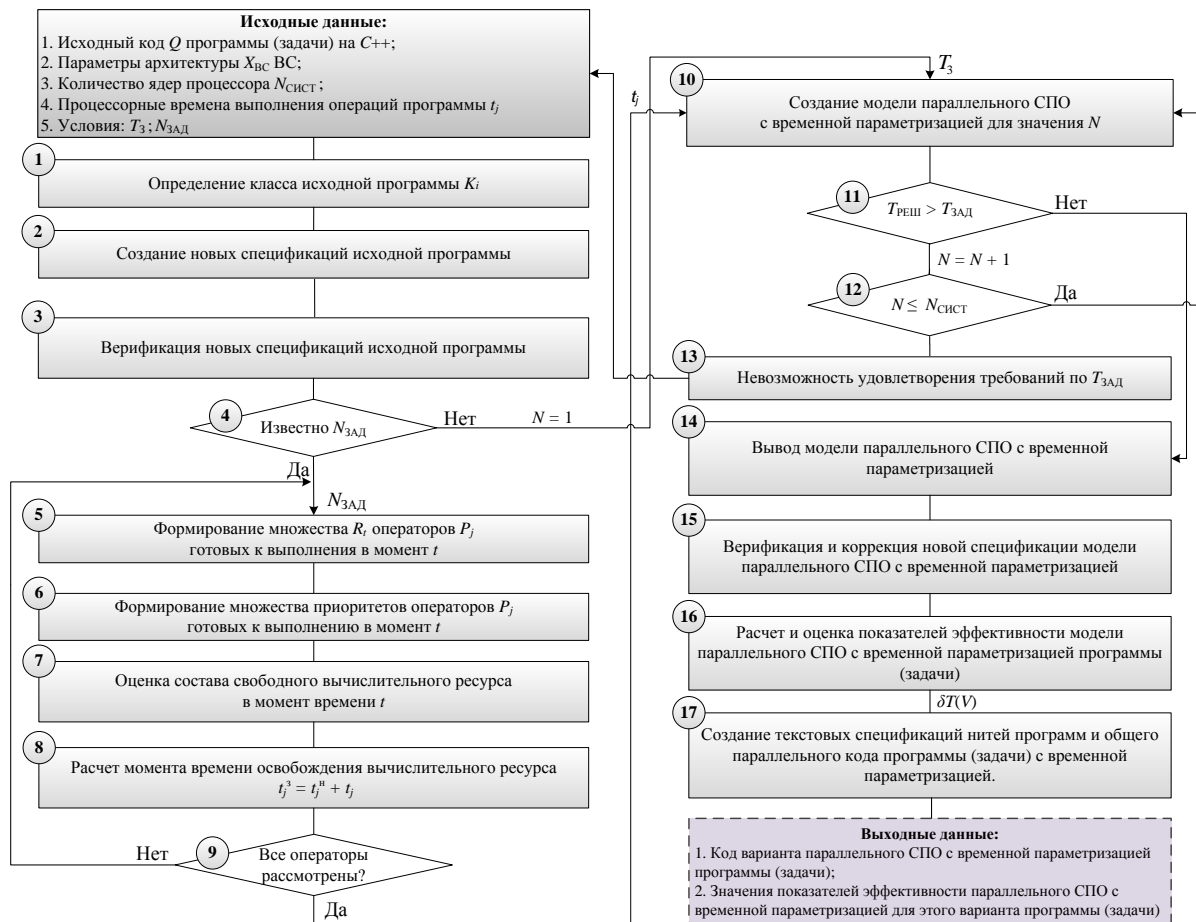


Рис. 2. Процедура создания варианта параллельного СПО с временной параметризацией

Шаг 1 (элемент 1 на рис. 2) – определение класса исходной программы K_i [5]: класс K_3 – разветвляющиеся простые и сложные алгоритмы, а также неразветвляющиеся простые и сложные алгоритмы; класс K_2 – циклические простые и циклические сложные алгоритмы с внутренними переходами, со смешанными переходами, с вложенными циклами с известным и неизвестным количеством итераций; класс K_1 – циклические комбинированные алгоритмы с внутренними переходами, с вложенными циклами и внутренними переходами, с вложенными циклами и смешанными переходами с известным и неизвестным количеством итераций.

Шаг 2 (элемент 2 на рис. 2) – создание новых спецификаций исходной программы (семантические, числовые, графические, комбинированные и др.) [7–9].

Шаг 3 (элемент 3 на рис. 2) – верификация новых спецификаций исходной программы [10–12].

Шаг 4 (элементы 4–12 на рис. 2) – реализация алгоритма создания модели параллельного СПО с временной параметризацией при ограничении доступного аппаратного ресурса.

Задачей алгоритма является формирование множества R_{t+1} готовых операторов $P_j \in G_{t+1}$, реализация которых может быть начата на вычислительной системе в момент $t+1$ при учете только числа свободных процессоров (ядер) в конкретный момент времени, а также приоритетов операторов.

Выполнение алгоритма заключается в выборе из G_{t+1} оператора с наивысшим приоритетом, проверке наличия достаточного для его реализации числа свободных ядер процессоров и назначении оператора на реализацию при выполнении этого условия. После назначения оператора на реализацию должно уточняться число свободных ядер. Далее эта последовательность действий повторяется для каждого готового к выполнению очередного по приоритету оператора.

При отсутствии необходимого для выполнения оператора свободного ядра процессора оператор включается в состав претендентов на начало реализации в очередной момент времени после освобождения необходимого ресурса.

Процесс назначения операторов $P_j \in G_t$ на реализацию заканчивается по завершении назначения на реализацию всех операторов из множества G_t . Таким образом, выполнение процедуры состоит в реализации за конечное число действий (уровней параллельного алгоритма).

1. Формирование множества R_t операторов $P_j \in G_t$, готовых к выполнению в момент времени t :

$$R_t = \bigcup_{l=1}^s R_t^l. \quad (5)$$

Здесь R_t^l – оператор P_j , включаемый в G_t на s -м шаге алгоритма, определяемый как элемент множества $G_t^l = G_t \setminus R_t(l-1)$, где $G_t \setminus R_t(l-1)$ – множество операторов $P_j \in G_t$, включенных в G_t за $l-1$ предшествующих шагов. Вместе с тем оператор P_j должен иметь наивысший приоритет, при этом в составе аппаратного ресурса ВС имеется свободное ядро процессора.

2. Формирование множества приоритетов операторов, которые определяются по следующим стратегиям:

- по максимальному (минимальному) времени выполнения ветвей алгоритма, содержащих данный оператор в качестве начального оператора ветви [8];
- по времени выполнения оператора;
- присвоение абсолютных приоритетов некоторым операторам [8];
- «динамические приоритеты» (приоритет оператора может изменяться с течением времени и устанавливаться в определенные моменты времени в зависимости от выполнения некоторых условий) [8].

3. Формирование множества свободных в момент времени t ядер процессоров, осуществляющееся на основе обращения и получения признака «свободен».

4. Расчет момента завершения реализации оператора P_j и освобождения вычислительного ресурса:

$$t_j^3 = t_j^H + t_j, \quad (6)$$

где t_j – максимальное значение времени выполнения операции/функции соответствующим ядром процессора.

5. Проверка условий завершения формирования множества R_t , которая заключается в проверке истинности соотношения

$$\bigcup_{l=1}^s R_t^l = G_t \quad (7)$$

или следующих соотношений одновременно:

$$\bigcup_{l=1}^s R_t^l \subset G_t, \quad (8)$$

$$U_t = G_t \setminus \bigcup_{l=1}^s R_t^l \neq \emptyset \quad (9)$$

для любого $P_j \in U_t$.

Условие окончания разработки параллельной временной модели выполнения задачи заключается в завершении рассмотрения и расстановки на временных уровнях всех операторов задачи.

Шаг 5 (элемент 13 на рис. 2) – в случае невозможности удовлетворить требования по заданному времени необходимо увеличить аппаратный ресурс (количество ядер и/или процессоров).

Шаг 6 (элемент 14 на рис. 2) – вывод новых спецификаций типов данных, типов операций/функций над данными, связей операций по данным и по управлению, единиц измерения физических величин, моментов начала и длительности вычислительных операций/функций и операторов передач управления и синхронизации временных параллельных процессов.

Шаг 7 (элемент 15 на рис. 2) – верификация и оценка корректности разработанных новых спецификаций исходной программы с целью проверки эквивалентности текстовой спецификации программы задачи и ее представления новыми спецификациями, т. е. оценка типов данных, типов операций/функций над данными, связей операций по данным и по управлению, корректность единиц измерения физических величин, корректность моментов начала и длительности вычислительных операций/функций и операторов передач управления и синхронизации временных параллельных процессов, а также их коррекция в случае необходимости.

Шаг 8 (элемент 16 на рис. 2) – расчет и оценка показателей эффективности модели параллельного СПО с временной параметризацией по выражениям (3) и (4).

Шаг 9 (элемент 17 на рис. 2) – разработка текстовых спецификаций нитей параллельной программы с временной параметризацией, которая включает разработку следующих объектов:

– текстовых спецификаций временных нитей параллельной программы со встроенными средствами временной синхронизации;

– структур временной спецификации параллельной программы в виде индивидуальных текстов нитей программ процессоров ВС со встроенными средствами временной синхронизации.

Основные этапы разработки текстовых спецификаций временных нитей программ параллельной программы включают:

1) цикл по номерам операторов и определение номера процессора, реализующего оператор;

2) формирование текстовой спецификации оператора/операции, включающее:

– определение типа процессорной команды;

– для формирования программы – выборку имен сопряженных операторов и запись текстовой спецификации оператора;

- при формировании процессорных нитей программ – выборку имен сопряженных операторов, замену имен операторов на их действительные адреса и запись текстовой спецификации;
- временную параметризацию операторов процессорных нитей программ;
- представление текстовых спецификаций нитей программ с временной параметризацией каждого из процессоров для программ в виде совокупности строк следующего вида: номера команд нитей программ процессоров; признак класса операции; имя операции; адреса первого и второго операндов; значение текущего дискретного времени, соответствующего началу реализации операторов задачи.

После создания варианта параллельного СПО с временной параметризацией необходимо рассчитать совокупные затраты на доработку СПО при реализации этих вариантов. Для решения указанной задачи на данный момент существуют несколько подходов, например: на основе определения строк исходного кода [13], на основе определения вариантов использования [14], на основе определения функциональных точек [14] и др. Подход на основе определения функциональных точек базируется на определении размера СПО в терминах количества и сложности функций, реализуемых в программном коде [15].

Учитываемая функция ограничения по затратам имеет вид $C(V|X_{BC})$ и рассчитывается по формуле

$$C_{\Sigma}(V|X_{BC}) = C(V|X_{BC})_{\text{ПЕРС}} + C(V|X_{BC})_{\text{АМОРТИЗ}} + C(V|X_{BC})_{\text{ДОП}} + C(V|X_{BC})_{\text{КОМАНД}} + C(V|X_{BC})_{\text{ОБУЧ}}, \quad (10)$$

где $C(V|X_{BC})_{\text{ПЕРС}}$ – затраты на оплату труда программиста;
 $C(V|X_{BC})_{\text{АМОРТИЗ}}$ – сумма амортизационных отчислений (затраты на оборудование, его износ);
 $C(V|X_{BC})_{\text{ДОП}}$ – дополнительные расходы, связанные с организацией комфортных условий для работников;
 $C(V|X_{BC})_{\text{КОМАНД}}$ – расходы на командировки;
 $C(V|X_{BC})_{\text{ОБУЧ}}$ – затраты на обучение.

При анализе затрат необходимо учитывать конъюнктуру рынка на цены по доработке СПО. Разница в значениях стоимости обусловлена, в первую очередь, ценовой политикой ИТ-компаний, занимающихся областью разработки ПО. В целом стоимость контрактов имеет пропорциональную зависимость от количества итераций последовательности внедрения программного продукта в промышленное (серийное) использование и опыта разработчика.

Значения функции ограничения должны быть меньше $C_{\text{доп}}$, т. е. меньше допустимых совокупных затрат на доработку СПО, которые устанавливаются в соответствии с положением о государственном регулировании цен на продукцию, поставляемую по государственному оборонному заказу. Таким образом, условия ограничения имеют вид (2) и их необходимо учесть при решении задачи оптимизации.

На следующем этапе следует решить оптимизационную задачу выбора рационального варианта создания параллельного СПО с временной параметризацией (рис. 3) при помощи известной процедуры [19]. Вид целевой функции не известен, следовательно, нет возможности проверить на линейность и использовать метод линейного программирования. Однако значительно снизить размерность решаемой задачи и повлиять на метод ее решения может анализ количества оптимизируемых k переменных. Так как $k = 3$, то можно применить метод перебора (равномерного поиска), при котором вид целевой функции становится инвариантным.

Процедура решения оптимизационной задачи выбора рационального варианта создания параллельного СПО с временной параметризацией позволяет найти вариант создания параллельного СПО с временной параметризацией со значениями оптимизируемых переменных, при которых показатель снижения временных затрат $\delta T(V)$ принимает максимальное значение в условиях ограничений затрат $C_{\text{доп}} = 210$ тыс. руб. [17] на реализацию метода.

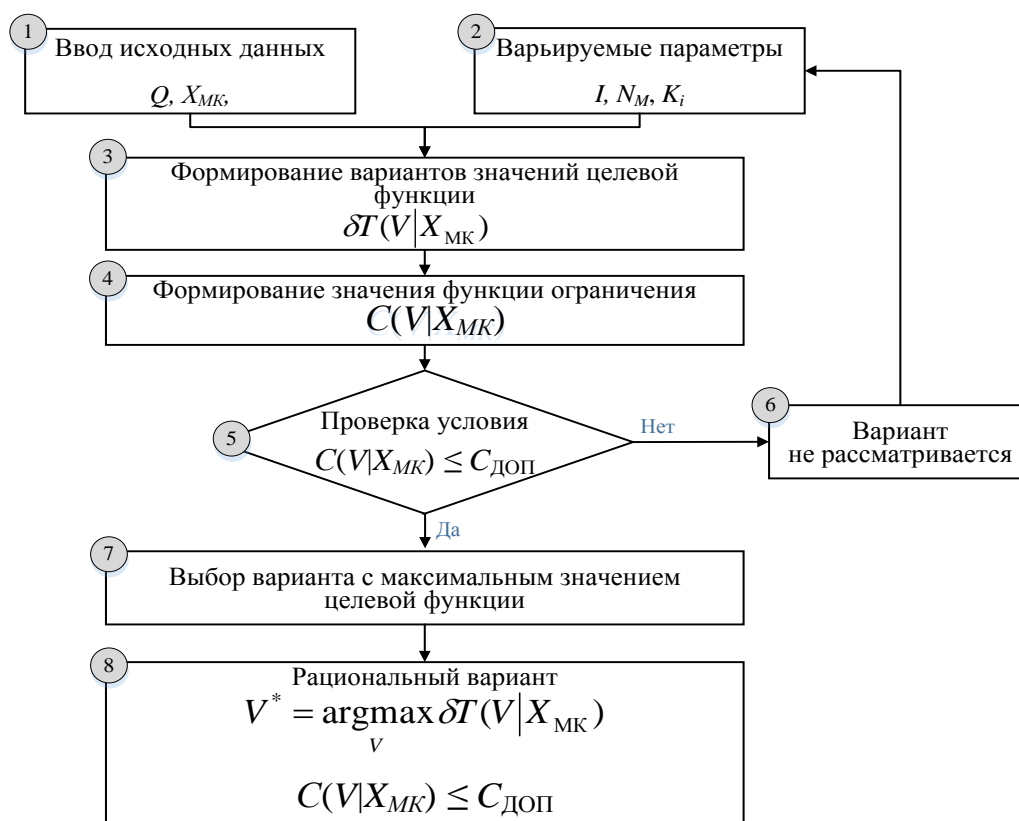


Рис. 3. Процедура решения оптимизационной задачи выбора рационального варианта создания СПО с временной параметризацией

Результатом решения оптимизационной задачи с учетом принятых экономических ограничений являются рациональные варианты создания параллельного СПО с временной параметризацией для соответствующего класса K_i расчетных задач (табл. 1).

Таблица 1

Рациональные варианты создания параллельного СПО с временной параметризацией

№ п/п	Наименование расчетной задачи	Параметры варианта создания параллельного СПО с временной параметризацией для МК ВН			Ускорение $\delta T(V)$, раз	Заграты на доработку СПО, $C(V X_{МК}, Q)$, тыс. руб.
		Тип архитектуры ЦП, I	Количество ядер, N_I	Класс расчетной задачи, K_S		
1	Расчет и отображение радиолокационного поля группировки средств радиолокационной разведки (задача 1)	Суперскалярный	3	K_3	1,13	149
2	Распределение средств воздушного нападения противника по объектам в границах ответственности группировки войск (сил) ПВО (задача 4)	Суперскалярный	3		1,19	165

Окончание табл. 1

№ п/п	Наименование расчетной задачи	Параметры варианта создания параллельного СПО с временной параметризацией для МК ВН			Ускорение $\delta T(V)$, раз	Затраты на доработку СПО, $C(V/X_{МК}, Q)$, тыс. руб.
		Тип архитектуры ЦП, I	Количество ядер, N_I	Класс расчетной задачи, K_S		
3	Расчет и отображение областей боевого взаимодействия истребительной авиации (задача 3)	Суперскалярный	3	K_2	1,23	157
4	Оперативный прогноз потенциальных возможностей группировки войск (сил) ПВО и выборка рекомендаций по ее усилению (задача 6)	Суперскалярный	3		1,28	162
5	Расчет и отображение зон зенитного ракетного огня группировки ЗРВ (задача 2)	Суперскалярный	3	K_1	1,42	197
6	Оценка электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств группировки войск (сил) ПВО (задача 5)	Суперскалярный	4		1,37	156

Предложенный метод создания параллельного СПО с временной параметризацией был реализован аппаратно [18] и программно [19].

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА

Для экспериментальной оценки эффективности применения метода создания параллельного СПО с временной параметризацией использован исходный код моделирующего комплекса, позволяющий моделировать боевые действия противоборствующих группировок в воздушно-космической сфере и оценивать их результаты в едином интерактивном пространственно-временном контуре управления. Были получены рациональные варианты по распараллеливанию шести информационно-расчетных задач.

При моделировании были использованы 10 вариантов исходных данных боевых действий расчетных задач (табл. 1), с каждым из которых проведено 10 запусков.

На рис. 4 представлена сравнительная характеристика усредненных временных затрат всех вариантов на моделирование военных (боевых) действий при использовании:

- исходного кода задач;
- метода распараллеливания циклов [20];
- предлагаемого метода.

Результаты проведенных экспериментов показали, что моделирование с использованием параллельного СПО с временной параметризацией, проведенное с применением разработанного метода, позволяет значительно сократить время выполнения расчетных задач, а соответственно, и время выполнения моделирования военных (боевых) действий:

- при использовании метода распараллеливания циклов в среднем на 13%;
- при использовании исходного последовательного кода в среднем на 27%.

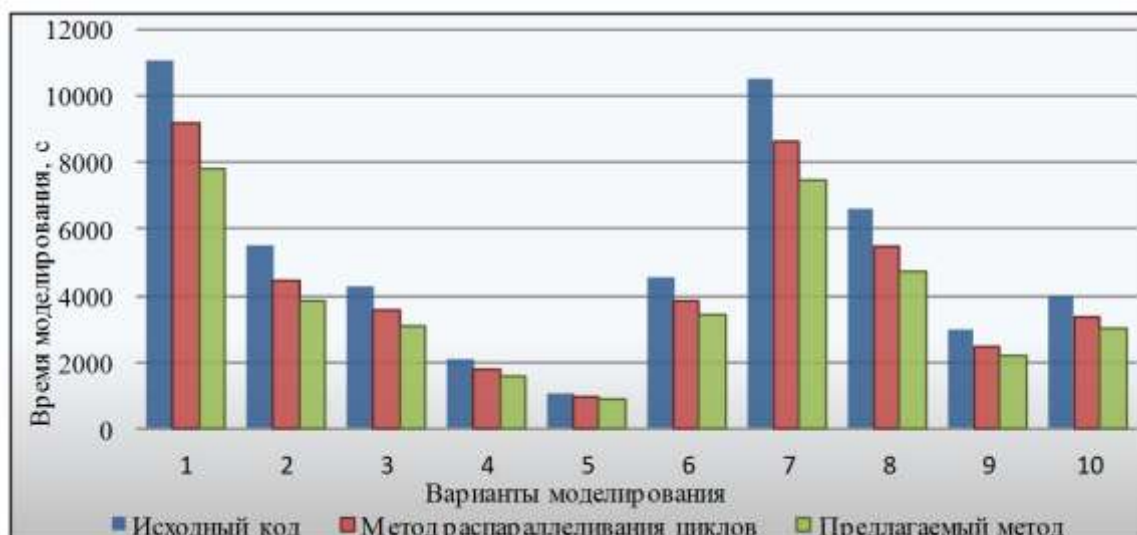


Рис. 4. Сравнительная характеристика усредненных временных затрат всех вариантов на моделирование военных (боевых) действий

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования создания параллельного СПО с временной параметризацией позволили:

- обосновать метод создания параллельного СПО с временной параметризацией многопроцессорных вычислительных систем с одинаковым доступом к памяти;
- сформировать варианты параллельного СПО с временной параметризацией (5)–(9), в зависимости от требований заказчика;
- рассчитать показатели эффективности функционирования СПО с временной параметризацией (3), (4);
- рассчитать совокупные затраты на доработку СПО с временной параметризацией;
- решить задачу оптимизации выбора рационального варианта параллельного СПО с временной параметризацией.

Таким образом, предложенный метод позволил выбрать рациональный вариант параллельного СПО с временной параметризацией по критерию максимизации ускорения с учетом ресурсных ограничений. При этом достоверность обеспечивается соответствием выходных данных исходной программы выходным данным программы с использованием предложенного метода.

Список используемых источников

1. Суровикин С. В., Кулешов Ю. В. Особенности организации управления межвидовой группировкой войск (сил) в интересах комплексной борьбы с противником // Военная мысль. – 2017. – № 8. – С. 5–18.
2. Метод выбора технологии создания параллельного специального программного обеспечения с временной параметризацией / А. А. Толмачев [и др.] // Журнал Сибирского федерального университета. Сер. : Техника и технологии. – 2022. – № 15 (8). – С. 1000–1008.
3. Орлов С. А., Цилькер Б. Я. Организация ЭВМ и систем : учебник для вузов. – СПб. : Питер, 2011. – 688 с.

4. *Толмачев А. А.* Актуальные проблемы создания параллельного специального программного обеспечения вычислительной системы Главного центра разведки космической обстановки // XXXII Всероссийская научно-техническая конференция школы-семинара «Передача, прием, обработка и отображение информации о быстропротекающих процессах»: сб. ст. / под общ. ред. О. Т. Чижевского. – М.: ИД Академии Жуковского, 2022. – С. 378–384.
5. *Поляков Г. А., Умрихин Ю. Д.* Автоматизация проектирования сложных цифровых систем коммутации и управления. – М.: Радио и связь, 1988. – 304 с.
6. *Самхарадзе К. К., Ерошенко Я. Б.* Сравнительный анализ эффективности применения технологий параллельного программирования // Научный аспект. – 2018. – Т. 2, № 2. – С. 223–236.
7. *Карцев М. А., Брик В. А.* Вычислительные системы и синхронная арифметика. – М.: Радио и связь, 1981. – 360 с.
8. *Юдин Д. Б., Горяшко А. П., Немировский А. А.* Математические методы оптимизации устройства и алгоритмов АСУ. – М.: Радио и связь, 1984. – 288 с.
9. *Луцаев В. В.* Проектирование математического обеспечения АСУ. – М.: Сов. радио, 1977. – 400 с.
10. *Умрихин Ю. Д.* Оптимизация сложных информационных систем. – М.: Минрадио-пром, 1983. – 125 с.
11. *Луцаев В. В.* Тестирование компонентов и комплексов программ. – М.: СИНТЕГ, 2010. – 400 с.
12. *Семахин А. М.* Методы верификации и оценки качества программного обеспечения. – Курган: Изд-во КГУ, 2018. – 150 с.
13. *Лобанова Н. М., Дубровин Д. А.* Оценка затрат на качество программного обеспечения // Вестник университета. – 2016. – № 6. – С. 87–91.
14. *Ваганова Е. В., Земцов А. А., Миньков С. Л.* Оценка стоимости разработки программного продукта: обзор // Проблемы учета и финансов. – 2016. – № 1 (21). – С. 58–62. – DOI: 10.17223/22229388/21/8.
15. Основы инженерии качества программных систем / Ф. И. Андонов [и др.]. – Киев: Академперіодика, 2007. – 672 с.
16. *Пантелеев А. В., Леонова Т. А.* Методы оптимизации в примерах и задачах. – М.: Высш. школа, 2005. – 544 с.
17. Положение о государственном регулировании цен на продукцию, поставляемую по государственному оборонному заказу: утв. Постановлением Правительства РФ № 1465 от 2 дек. 2017 г. (ред. от 16.03.2021) / Правительство Российской Федерации. – М., 2017. – 72 с.
18. Пат. 2786347 Российская Федерация, МПК G06F 8/40 (2018.01), G06F 9/00 (2006.01). Способ автоматического создания параллельной программы с временной параметризацией многопроцессорных вычислительных систем с одинаковым доступом к памяти / Толмачев А. А., Калачников А. С., Викторов Д. С., Брежнев Д. Ю., Якунина Г. Р. – № 2022106321; заявл. 09.03.2022; опубл. 20.12.2022, Бюл. № 35. – 12 с.
19. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2022616710. Программа автоматического распараллеливания программ с временной параметризацией многопроцессорных вычислительных систем с одинаковым доступом к памяти / А. С. Калачников, А. А. Толмачев, Д. С. Викторов. – № 2022615995; заявл. 06.04.2022; опубл. 15.04.2022, Бюл. № 4. – 1 с.
20. *Аксенов М. А.* Метод создания параллельных программных средств моделирующих комплексов военного назначения // Программные продукты и системы. – 2022. – Т. 35, № 1. – С. 83–94. – DOI: 10.15827/0236-235X.137.083-094.

В. И. Горбулин,
доктор технических наук, профессор;
П. В. Горбулин;
А. В. Статкевич;
И. А. Фадин,
кандидат технических наук

МЕТОД ЦЕЛОЧИСЛЕННОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ МИНИМАКСНОЙ ЗАДАЧИ О НАЗНАЧЕНИЯХ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ УПРАВЛЕНИИ СЛОЖНОЙ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ

В статье сделан обзор практических приложений задач о назначениях, их постановок, методов и алгоритмов решения. Отмечается, что методы и алгоритмы их решения отличаются широким многообразием. Определены значимые отличия минимаксной задачи о назначениях, иначе называемой задачей на «узкие места». Этой задаче вследствие слабой упорядоченности планов по возрастанию целевой функции присуще свойство неединственности оптимального решения, которое открывает дополнительные возможности для многокритериальной оптимизации. Разработан оригинальный метод решения минимаксной задачи для случая, когда каждый исполнитель выполняет только одно задание, предложена модификация известного венгерского метода решения задач о назначениях с неаддитивной целевой функцией.

Ключевые слова: задача о назначениях, минимаксная целевая функция, задача на узкие места, слабая упорядоченность планов, оптимальный план, множество возможных назначений, список возможных назначений.

ВВЕДЕНИЕ

Решение прикладных задач распределения ресурсов и многих других основывается, в частности, на рассмотрении задач комбинаторной оптимизации, в том числе задач о назначениях. Практические приложения данного класса задач встречаются во многих областях деятельности: в промышленности, строительстве, транспорте, образовании, медицине, в военном деле, экономике и т. д. [1–3]. Зачастую в практике применения сложных организационно-технических систем возникает потребность оперативного решения задач о назначениях, в частности, при возникновении неисправностей или изменении исходных данных, например для случая мобильных исполнителей, которые на разных временных интервалах могут обслуживать разных потребителей. В этих случаях время решения задачи распределения ресурсов влияет на вероятность нахождения оптимального решения.

АНАЛИЗ РАБОТ В ОБЛАСТИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ О НАЗНАЧЕНИЯХ

Типовые постановки задач о назначениях затрагивают проблему выбора для стационарного варианта размещения исполнителей и объектов обслуживания. При этом выделяют класс задач с аддитивной целевой функцией (функцией выигрыша) [4] и так называемые минимаксные задачи или задачи на «узкие места» [1, 2]. Формализованная постановка задачи может быть представлена в следующем виде.

Пусть имеется n исполнителей (сервисёров) A_1, A_2, \dots, A_n , которые должны осуществить обслуживание n объектов B_1, B_2, \dots, B_n , причем эффективность воздействия i -го исполнителя для обслуживания j -го объекта характеризуется величиной c_{ij} , $i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, n$ (где i – номер исполнителя, j – номер объекта). Квадратная матрица $C = [c_{ij}]$ затрат ресурсов

(стоимостей, временных затрат и т. п.) отражает степень целесообразности выбора сервисёра для обслуживания того или иного объекта.

Требуется найти такой план организации операции сервисного обслуживания заданной совокупности объектов (вариант распределения сервисёров), чтобы суммарный эффект их задействования был наибольшим. Если ввести z_{ij} индикатор назначения:

$$z_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-й сервисёр назначен на } j\text{-й объект,} \\ 0 & \text{– в противном случае,} \end{cases}$$

то математически задачу можно представить следующим образом: найти кортеж $\{z_{ij}\}$, $i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, n$, максимизирующий целевую функцию (функцию выигрыша)

$$F(Z) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} z_{ij} \quad (1)$$

и удовлетворяющий ограничениям:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n z_{ij} = 1 \quad \forall j = 1, \dots, n, \\ \sum_{j=1}^n z_{ij} = 1 \quad \forall i = 1, \dots, n. \end{cases} \quad (2)$$

Для решения задачи в данной постановке наиболее эффективным признан метод, основанный на результатах венгерского математика Е. Эгервари и получивший в связи с этим название венгерского [4]. Суть этого метода состоит в том [4], что исходная задача последовательно претерпевает несколько эквивалентных трансформаций, сопряженных с преобразованием матрицы C затрат ресурсов (стоимостей) по определенному правилу. После каждого преобразования все элементы матрицы остаются неотрицательными, а количество так называемых «независимых нулей» увеличивается по крайней мере на единицу. Процесс заканчивается тогда, когда количество независимых нулей достигает числа n – количества исполнителей и объектов, а их расположение в матрице C определяет искомым набор индикаторов $Z^* = \{z_{ij}^*\}$, что является решением задачи.

В качестве целевого показателя в динамических операциях по обслуживанию заданной совокупности объектов часто выступает длительность этой операции, которая определяется моментом окончания сервисного обслуживания последнего объекта, т. е. целью оптимизации является *минимизация максимальной длительности обслуживания* одного из объектов. Такие задачи в литературе получили название минимаксных задач о назначениях или задач на узкие места. Данный класс задач, в отличие от задач с аддитивной (линейной) целевой функцией, является менее изученным.

Постановка минимаксной задачи (задачи на «узкие места») отличается только видом целевой функции: если в качестве расходуемого на операцию ресурса принять время $c_{ij} \equiv \tau_{ij}$ (здесь τ_{ij} – длительность сервисного обслуживания i -м исполнителем j -го объекта), то длительность $\Delta t_{\text{обслуж}}$ операции обслуживания всей совокупности объектов будет определяться моментом завершения обслуживания последнего объекта, т. е. целевая функция запишется в виде

$$\Delta t_{\text{обслуж}}(Z) = \min_Z \max_{(i,j):z_{ij}=1} \tau_{ij} z_{ij}. \quad (3)$$

Хотя внешне разница между постановками задач выглядит несущественной, на самом деле отличие очень значимо в силу следующих обстоятельств:

– оптимальное решение задачи с аддитивной целевой функцией может быть сколь угодно плохим в задаче на узкие места и наоборот;

– множество допустимых вариантов назначений в задаче на узкие места является слабо упорядоченным в сравнении с задачей с аддитивной функцией. Характерной особенностью последней является то, что для любой пары вариантов назначений значения целевой функции не совпадают (вообще говоря, в зависимости от исходных данных задачи, такое событие может встречаться, но оно крайне маловероятно). Поэтому, в частности, задача с аддитивной целевой функцией имеет, как правило, единственное решение. Напротив, для задачи с минимаксной целевой функцией характерно совпадение значений выигрыша для некоторого подмножества вариантов решений. Содержательно это означает, что такие варианты объединяет одна и та же пара «исполнитель-объект», которая и определяет значение целевой функции, поскольку другие сервисёры для этого варианта операции обслуживания других объектов выполняют с лучшими показателями. Следствием слабой упорядоченности планов для задачи на узкие места является неединственность оптимального решения Z^* (т. е. существование некоторого множества Δ_{Z^*} оптимальных решений), что открывает возможность дальнейшей оптимизации по дополнительным целевым показателям;

– методы решения задачи с аддитивной целевой функцией не могут быть применены (без существенной адаптации) для решения задачи с минимаксной целевой функцией. Поэтому для задач на узкие места разработаны специализированные алгоритмы.

Известен метод ветвей и границ, который ограниченно применим для задач большой размерности [5]. В [6] представлен алгоритм последовательного улучшения решений, основанный на некотором условии оптимального плана, смысл которого сводится к тому, что для улучшения решения на очередной итерации необходимо и достаточно существование цепочки определенного вида, составленной из некоторых элементов матрицы исходных данных. Содержательный смысл цепочки сводится к нахождению переназначений таким образом, чтобы уменьшить значение целевой функции. Если же таковой цепочки не существует, то улучшающее переназначение произвести нельзя и, следовательно, найденный план является оптимальным. Основной трудностью алгоритма является отыскание цепочек, напоминающее известную в теории графов задачу об отыскании кратчайшего пути в лабиринте.

В прикладных технических задачах часто каждый исполнитель обладает возможностью обслужить не один, а несколько объектов независимо друг от друга. Возникающая при этом задача может быть сведена к известным постановкам задачи о назначениях с равным количеством исполнителей и объектов путем введения в рассмотрение фиктивных (виртуальных) исполнителей с аналогичными возможностями (при этом многие строки в матрице исходных данных повторяются). Однако при этом происходит расширение множества возможных назначений, что приводит к возрастанию количества анализируемых вариантов и представляется не вполне рациональным выходом из данной ситуации.

Другой отличительной чертой прикладных технических задач является мобильный характер участников исследуемой операции, т. е. исполнители и объекты могут являться активными подвижными средствами. Такие особенности влекут за собой изменение постановок задач и, возможно, требуют совершенствования методов решения. В частности, на моменты начала и интервалы возможного выполнения обслуживания могут накладываться дополнительные ограничения. Вследствие этого множество возможных назначений может оказаться значимо разреженным по сравнению с обычной задачей, что повлечет существенное сокращение множества альтернатив. В этих условиях могут быть предложены специализированные алгоритмы, превосходящие известные по оперативности решения или объему потребной памяти вычислителей для рассматриваемых нетиповых постановок задач.

В [7] предлагается решение задачи планирования процесса взаимодействия активных подвижных средств осуществлять на основе динамической интерпретации технических операций и вводится понятие «состояние операции по обслуживанию объектов». Изменение этого

состояния описывается обыкновенными дифференциальными уравнениями при ограничениях дискретно-непрерывного типа. В дальнейшем методом локальных сечений исходная задача неклассического вариационного исчисления сводится к краевой задаче. Основной трудностью решения такой двухточечной задачи является наличие прерываний состояния операций, которые должны быть устранены алгоритмически. Предлагается алгоритм устранения разрывов, в основу которого положена идея комбинированного использования метода ветвей и границ и метода последовательных приближений Крылова – Чернуоусько.

Отмечается, что скорость сходимости алгоритма в наибольшей степени зависит от выбора начального приближения допустимого решения задачи планирования.

В [8] задача о назначениях рассматривается в двух постановках: производится минимизация длительности операции или максимизация вероятности успешного обслуживания объектов за заданное время, для чего разработаны эвристические алгоритмы решения поставленных задач на основе идей стохастического программирования и теории эффективности с использованием элементов метода запрещенных клеток, которые далеко не всегда позволяют получать оптимальные решения.

Следует отметить, что в случае, когда один исполнитель может обслужить несколько объектов, вследствие чего количество исполнителей может быть существенно меньше количества объектов, вариант назначения можно трактовать как разбиение определенным образом множества номеров на несколько непересекающихся подмножеств. При этом задача о назначениях в содержательном плане близка к задачам кластерного анализа [9]. Однако в этих задачах не накладывается ограничение на количество объектов, входящих в каждый кластер, что осложняет применение разработанных алгоритмов для решения задач назначений.

Одним из путей развития алгоритмов кластерного анализа является их адаптация к задачам с большой степенью неопределенности исходных данных. Предлагаемый в [3] метод основан на идее сочетания кластерного анализа и нечеткой логики и отличается сравнительной простотой по отношению к базовым методам многомерной непараметрической статистики. Отмечается, что применение нечеткой кластеризации объектов в условиях неопределенности позволяет уменьшить количество ложных распознаваний объектов по сравнению с существующим статистическим подходом, ориентированным на использование нормального закона распределения.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Далее рассматривается минимаксная задача о назначениях для исследования операций, в которых предполагается взаимодействие активных подвижных объектов. Вследствие этого на интервале планирования $T_{\text{план}}$ для некоторых объектов одним из исполнителей обслуживание оказывается невозможным, при этом считается, что длительность данной операции обслуживания равна бесконечности – $\tau_{ij} = \infty$. Таким образом для каждого исполнителя формируется список возможных назначений Q_i по следующему правилу:

$$Q_i = \{j \in N_m \mid \tau_{ij} < \infty\}, \quad N_m = \overline{1, \dots, m}, \quad k_i^* = \text{card } Q_i, \quad k_i^* \leq m,$$

здесь функция card означает мощность множества, т. е. количество элементов, содержащихся в дискретном множестве.

Принятые обозначения позволяют представить математическую постановку рассматриваемой задачи в следующем виде.

Пусть имеется m исполнителей A_1, A_2, \dots, A_m , которые должны осуществить сервисное обслуживание n объектов B_1, B_2, \dots, B_n , $m < n$, причем i -й исполнитель на интервале планирования $T_{\text{план}}$ может обслуживать объекты с номерами из списка возможных назначений Q_i .

Кроме того, i -й исполнитель может обслужить одновременно (параллельно) не более q_i объектов, причем $\sum_{i=1}^m q_i \geq n$. Длительность обслуживания i -м сервисёром j -го объекта задается величиной τ_{ij} ($\tau_{ij} < \infty$, если $j \in Q_i$ и $\tau_{ij} = \infty$ – в противоположном случае).

Требуется найти множество Δ_{Z^*} оптимальных вариантов назначений Z^* , удовлетворяющих ограничениям:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n z_{ij} = 1 \quad \forall j = 1, \dots, n \\ \sum_{j=1}^n z_{ij} \leq q_i \quad \forall i = 1, \dots, m \\ z_{ij} \geq 0, \quad z_{ij} = 0 \vee 1, \quad i = 1, \dots, m, \quad j = 1, \dots, n \end{array} \right. \quad (4)$$

и обеспечивающих минимальную продолжительность операции обслуживания всей совокупности объектов, определяемую моментом завершения работы последнего сервисёра:

$$\Delta t_{\text{обслуж}}^*(Z^*) = \min_Z \max_{(i,j):z_{ij}=1} \tau_{ij} z_{ij} = \min_{p_1 \dots p_m} \min_{\substack{K^{(1)} \dots K^{(m)} \\ K^{(i)} \subseteq Q_i, \bigcup K^{(i)} = N_n}} \max_{i \in N_m} \max_{j \in K^{(i)}} \tau_{ij}, \quad (5)$$

$$\Delta_{Z^*} = \text{Arg min}_{Z \in \Delta_Z} \Delta \tau_{\text{обслуж}}(Z), \quad \Delta \tau_{\text{обслуж}}(Z) = \max_{i \in N_m} \max_{j \in K_i} \tau_{ij}, \quad (6)$$

где $p_i = \text{card } K^{(i)}$ – количество объектов, назначенных i -му исполнителю согласно плану Z^* , при этом $K^{(i)}$ – перечень (кортеж) номеров объектов, назначенных i -му исполнителю согласно плану Z^* , $K^{(i)} \subseteq Q_i$, $\bigcup_{i=1}^m K^{(i)} = N_n = \overline{1, \dots, n}$.

В уравнении (5) все неопределенности вида $0 \cdot \infty$ разрешаются как $0 \cdot \infty = 0$.

При рассмотрении задач о назначениях [6, 7] под допустимым планом обычно понимают такое распределение объектов обслуживания между средствами (исполнителями), предназначенными для выполнения функции взаимодействия, чтобы, во-первых, каждый объект был назначен одному и только одному исполнителю и, во-вторых, чтобы количество объектов, назначенных одному исполнителю не превосходило его ресурсы. Иными словами, план представляет собой разбиение множества номеров объектов $N_n = \overline{1, n}$ на k непересекающихся подмножеств $K^{(i)}$, таких что

$$\bigcup_{i \in N_m} K^{(i)} = N_n,$$

$$\text{card } K^{(i)} \leq q_i \quad \forall i \in N_m,$$

где $N_m = \overline{1, m}$ – множество номеров исполнителей.

ОПИСАНИЕ МЕТОДА РЕШЕНИЯ МИНИМАКСНОЙ ЗАДАЧИ О НАЗНАЧЕНИЯХ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ УПРАВЛЕНИИ СЛОЖНОЙ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ

Численное исследование разработанных алгоритмов решения минимаксных задач о назначениях показало их высокую эффективность для следующих исходных данных задач (условий их постановок):

- если множество возможных назначений по сравнению с обычной задачей является значительно разреженным. Такая ситуация возникает, в частности, при ограниченных возможностях исполнителей по обслуживанию мобильных объектов;
- если каждый исполнитель может обслуживать несколько объектов, причем их общее число значительно превышает количество сервисёров.

Однако при равенстве количества объектов и исполнителей по мере роста размерности задачи вычислительные затраты существенно возрастают. Поэтому возникает необходимость разработки нового алгоритма, устраняющего указанный недостаток. Одним из возможных путей достижения данной цели является использование некоторых процедур венгерского метода, предназначенного для оптимизации плана с аддитивной целевой функцией, для решения минимаксной задачи о назначениях.

С концептуальной точки зрения венгерский и представляемый в данной статье методы имеют много общего, а именно:

- процедура эквивалентных трансформаций постановок задач в венгерском методе и варьирование порогового значения целевой функции в новом методе преследуют целенаправленное изменение матрицы исходных данных, которая анализируется на следующих этапах;
- процедура определения количества так называемых «независимых нулей» в венгерском методе и анализ возможности распределения всех объектов между исполнителями алгоритмами комбинаторного анализа в новом методе предназначены для проверки условий формирования по крайней мере одного оптимального кортежа (плана).

Поскольку рост вычислительных затрат в рассматриваемом методе обусловлен комбинаторным характером задачи проверки условий формирования оптимального плана, то представляется целесообразным усовершенствовать предлагаемый метод с использованием идей аналогичной процедуры венгерского метода. Реализация данного подхода позволяет предложить модифицированный венгерский метод для решения минимаксных задач в условиях (1)–(6), основным содержанием которого являются следующие этапы.

Шаг 0 (предварительный). Ввести дополнительные мнимые (виртуальные) исполнители так, чтобы их число стало бы равно количеству объектов. Для этого достаточно в матрице $\tilde{T} = \{\tilde{t}_{ij}\}$ исходных данных строку i -го исполнителя повторить (скопировать) q_i раз (в результате матрица исходных данных станет квадратной); осуществить присвоение новых номеров исполнителям.

Перед рассмотрением основных этапов целесообразно ввести следующие понятия.

Система из \tilde{n} нулевых элементов ($\tilde{n} \leq n$), которая обладает тем свойством, что никакие два из них не лежат в одном столбце или в одной строке, называется системой независимых нулей. Пусть множество номеров строк, содержащих один из независимых нулей, называется сатисфакционным списком s назначения, а множество номеров строк, не содержащих независимых нулей – запретным списком \bar{s} назначения. Аналогично, множество номеров столбцов, содержащих один из независимых нулей, называется сатисфакционным списком r обслуживания, а множество номеров столбцов, не содержащих независимых нулей – запретным списком \bar{r} обслуживания. Нетрудно видеть, что для введенных обозначений справедливы следующие соотношения:

$$s \cup \bar{s} = N_n, \quad r \cup \bar{r} = N_n, \quad \text{card } s = \text{card } r = \tilde{n}, \quad \text{card } \bar{s} = \text{card } \bar{r} = n - \tilde{n}.$$

Шаг 1. Определение нового порогового значения τ^* (времени окончания обслуживания), формирование матрицы $\tilde{T} = \{\tilde{\tau}_{ij}\}$.

Пусть на очередной итерации установлено, что матрица $\tilde{T}(\tau^*)$ характеризуется системой \tilde{n} независимых нулей и запретными списками \bar{s} назначения и \bar{r} обслуживания. Тогда новое пороговое значение τ^* определяется по правилу:

$$\tau^* = \max(\tau_s^*, \tau_r^*), \quad \tau_s^* = \min_{i \in \bar{s}} \max_{j \in N_n} \tau_{ij}, \quad \tau_r^* = \min_{j \in \bar{r}} \max_{i \in N_n} \tau_{ij},$$

на основании которого происходит формирование матрицы $\tilde{T}(\tau^*)$:

$$\tilde{\tau}_{ij} = \begin{cases} \tau_{ij}, & \text{если } \tau_{ij} > \tau^* \\ 0, & \text{если } \tau_{ij} \leq \tau^*. \end{cases}$$

Шаг 2. Определение начального варианта новой системы независимых нулей.

Вначале один из нулевых элементов первого столбца матрицы $\tilde{T}(\tau^*)$ выделяется звездочкой (символ 0^*). Потом последовательно анализируются все последующие столбцы: помечаются звездочкой только нулевые элементы, не лежащие в одной строке с ранее выделенными нулями 0^* . По окончании определяется количество \tilde{n} независимых нулей полученной системы и формируются сатисфакционные s , r и запретные \bar{s} , \bar{r} списки обслуживания. Если выполняется равенство $\tilde{n} = n$, то осуществляется переход к завершающему этапу (шаг 5), иначе – к шагу 3.

Шаг 3. Проверка возможности за счет переназначений увеличить количество независимых нулей без изменения порогового значения.

Если среди столбцов с номерами из запретного списка обслуживания r нет ни одного нулевого элемента, то необходимо расширить множество возможных назначений; выполняется переход к шагу 1. Если же хотя бы один ненулевой элемент имеется, то производится дальнейший анализ возможности переназначений: проверяется, содержит ли строка с этим элементом еще и нуль, отмеченный звездочкой. При положительном исходе найденный невыделенный нуль отмечается штрихом (символ $0'$), номер соответствующей строки заносится в сатисфакционный список s назначения, а номер столбца, в котором расположен нулевой элемент 0^* , лежащий в только что выделенной строке, из списка r переносится в список \bar{s} ; шаг 3 повторяется. При отрицательном исходе невыделенный нуль отмечается штрихом $0'$, формируется цепочка нулей по следующему правилу. Начиная с нуля со штрихом $0'$, в одной строке с которым нет нуля за звездочкой 0^* , потом 0^* , расположенный с ним в одном столбце, далее $0'$, лежащий в одной строке с предшествующим 0^* и т. д. Иными словами, цепочка образуется перемещением от $0'$ к 0^* по столбцу, от 0^* к $0'$ по строке и т. д.

Шаг 4. В сформированной цепочке звездочки стираются, а штрихи заменяются звездочками; соответствующим образом корректируются списки s , \bar{s} , r и \bar{r} . При этом общее количество нулей со звездочкой увеличивается на единицу, т. е. система независимых нулей увеличивается на один элемент: $\tilde{n} = \tilde{n} + 1$. Если после этого выполняется равенство $\tilde{n} = n$, то осуществляется переход к следующему шагу, иначе – к шагу 3.

Шаг 5. Построение оптимального множества возможных назначений, на основе которого формируются все возможные решения (оптимальные планы) решения минимаксной задачи о назначениях.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗРАБОТАННОГО МЕТОДА

Модификация венгерского метода реализована на языке Object Pascal и скомпилирована в библиотеку для возможности использования с другими языками программирования.

Ниже представлены результаты применения указанной модификации венгерского метода для решения задачи о назначениях при матрице затрат ресурсов

$$C = \begin{bmatrix} 34 & 47 & 25 & 83 & 29 \\ 49 & 16 & 88 & 29 & 78 \\ 98 & 50 & 89 & 83 & 3 \\ 15 & 15 & 51 & 3 & 58 \\ 2 & 78 & 65 & 77 & 71 \end{bmatrix} \cdot$$

Оптимальное решение задачи о назначениях представляется в виде вектора (5, 2, 1, 4, 3), который означает, что первый объект обслуживается пятым исполнителем, второй объект – вторым и т. д.

Проверка работоспособности модификации венгерского метода осуществлялась полным перебором возможных назначений и подтвердила достоверность получаемых результатов.

Среднее время решения задачи о назначениях с использованием предложенного метода и полного перебора представлено в табл. 1 и на рис. 1. Задача решалась с использованием программного обеспечения, разработанного на языках *Object Pascal* и C++, на персональном компьютере с процессором AMD Athlon II X2 255 частотой 3.1 ГГц, оперативной памятью частотой 533 МГц. Исходные данные (матрица *C*) и результаты решения задачи записывались в бинарный файл. Скорость последовательного чтения с накопителя 64.34 МБ/с, скорость последовательной записи 58.63 МБ/с, скорость случайного чтения с накопителя 0.75 МБ/с. Вычисления производились в один поток.

Таблица 1

Среднее время решения задачи о назначениях с использованием модификации венгерского метода и полного перебора

Размерность задачи	Среднее время поиска решения с помощью модифицированного венгерского метода, с	Среднее время поиска решения с помощью полного перебора, с
5x5	0,016	0,0004
6x6	0,02	0,0019
7x7	0,024	0,015
8x8	0,031	0,128
9x9	0,045	1,309
10x10	0,05	14,113
11x11	0,05	194,7
12x12	0,051	2298,73

Результаты анализа полученных данных говорят о том, что вплоть до размерности задачи 7x7 предпочтительным с точки зрения затрат машинного времени является метод полного перебора. Но так как временная сложность последнего растет вместе с размерностью задачи как факториал, то начиная с размерности задачи 8x8 предпочтительной является модификация венгерского метода.

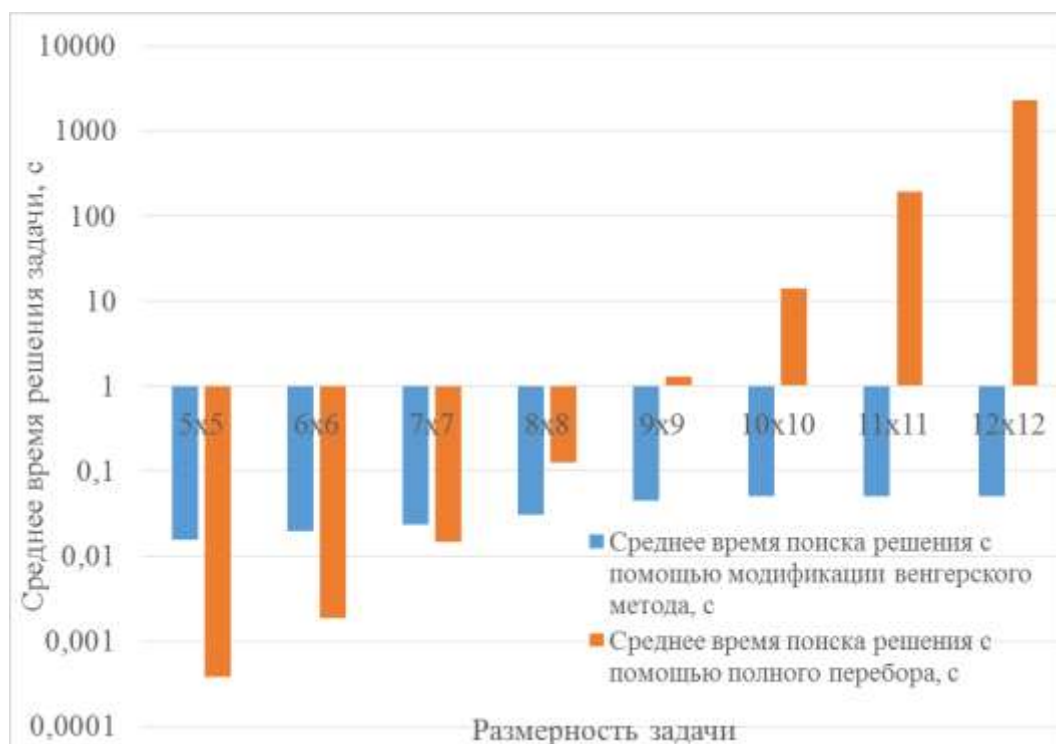


Рис. 1. Среднее время решения задачи о назначениях с использованием модификации венгерского метода и полного перебора

На рис. 2 представлена зависимость среднего времени решения задачи о назначениях с использованием разработанного метода от размерности задачи.

При больших размерностях среднее время решения задачи составляет: при размерности 100x100 – примерно 7.9 с, 150x150 – примерно 16.51 с, 200x200 – примерно 103.2 с, 250x250 – примерно 120.51 с.

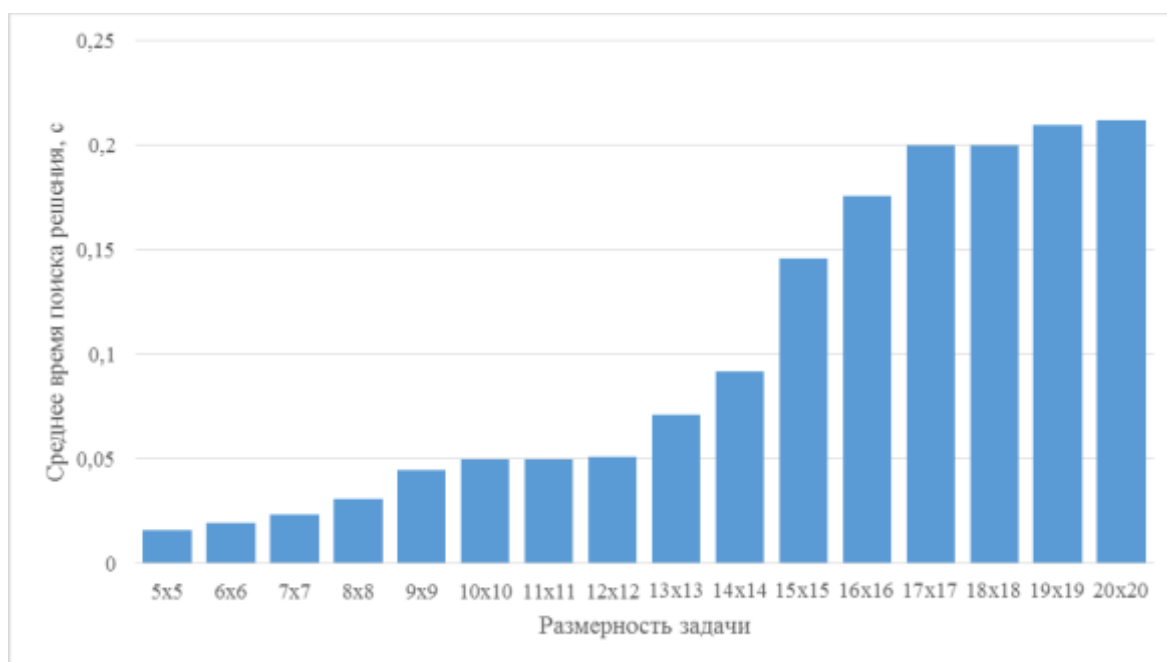


Рис. 2. Зависимость среднего времени решения задачи о назначениях с использованием разработанного метода от размерности задачи

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлена типовая постановка задач о назначениях, указано отличие классов задач с аддитивной и неаддитивной целевой функцией. Предложена модификация венгерского метода для решения минимаксной задачи о назначениях, проведено исследование влияния размерности задачи на время ее решения, а также сравнение времени решения задачи с помощью разработанного метода и полного перебора. Ввиду лучшей оперативности целесообразно применение разработанного метода для решения задач о назначениях большой размерности с неаддитивной целевой функцией.

Список используемых источников

1. Горбулин В. И. Решение комбинаторно-оптимизационных задач на основе метода фильтров // Методы и средства контроля: научно-техн. сб. – Л. : МО СССР, 1987. – С. 33–35.
2. Горбулин В. И. Методы и алгоритмы исследования автоматических систем управления: учеб. пособие. – Л. : МО СССР, 1988. – 92 с.
3. Применение кластерного анализа с элементами нечеткой логики для оценки окружающей обстановки группы робототехнических средств / М. П. Кочетков [и др.] // Труды СПИИРАН. – 2020. – Т. 19, № 4. – С. 746–773. – URL: www.proceedings.spiiras.nw.ru (дата обращения: 19.02.2023).
4. Резников Б. А. Методы и алгоритмы оптимизации на дискретных моделях сложных систем: учеб. пособие. – Л. : МО СССР, 1983. – 250 с.
5. Алексеев О. Г. Применение метода ветвей и границ для решения минимаксной задачи о назначениях // Техническая кибернетика. – 1978. – № 5. – С. 191–198.
6. Бородкин С. М. О минимаксной задаче назначений // Автоматика и телемеханика. – 1974. – № 10. – С. 105–115.
7. Калинин В. Н., Соколов Б. В. Оптимальное планирование процессов взаимодействия активных подвижных объектов // Дифференциальные уравнения. – 1985. – № 5. – С. 752–757.
8. Бовкун В. А., Волков В. Ф. Применение принципа декомпозиции к задаче исследования эффективности функционирования систем обслуживания динамичных объектов. – Л. : МО СССР, 1982. – 14 с.
9. Ту Дж., Гонсалес Р. Принципы распознавания образов. – М. : Мир, 1978. – 456 с.

Р. С. Володин,
кандидат технических наук;
А. В. Комиссаров,
кандидат военных наук;
М. Н. Тараканов

ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ РЕАЛИЗУЕМОЙ ЗОНЫ ОБНАРУЖЕНИЯ БАЛЛИСТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ПО СИГНАЛАМ НАЗЕМНЫХ НЕКООПЕРИРУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

В статье проведена оценка потенциальной реализуемой зоны обнаружения баллистических объектов специальным приемным устройством по сигналам наземных некооперируемых источников излучения.

Ключевые слова: наземный некооперируемый источник излучения, специальные приемные устройства, баллистический объект, прямой и отраженный сигнал, зона обнаружения, эффективная площадь рассеяния, овалы Кассини.

Основываясь на принципах разнесенной радиолокации [1, 2] и используя в качестве передающих устройств наземный некооперируемый источник излучения (НИИ), а в качестве приемных – свои специальные приемные устройства (СПУ) [3], можно обеспечить решение комплексной радиолокационной задачи, включающей обнаружение, оценку координат, сопровождение, получение информации о признаках селекции различных баллистических объектов (БО) [4]. Термин «некооперируемый» источник излучения определен в справочной литературе [5] и понимается как независимый источник сигналов. Особенностью такой системы является то, что параметры зондирующего сигнала априорно известны неточно, и неизвестен момент излучения. Таким образом, работа СПУ связана с априорной неопределенностью параметров зондирующего сигнала. Преодолеть неопределенность можно, получая оценки неизвестных параметров зондирующего сигнала, принимаемого непосредственно от излучающего наземного НИИ по боковым лепесткам диаграммы направленности ее передающей антенны. Используя полученные оценки при формировании опорного колебания, появляется возможность известными радиолокационными методами решить задачу приема отраженного от цели сигнала [6]. Принцип работы СПУ по сигналам наземного НИИ представлен на рис. 1.

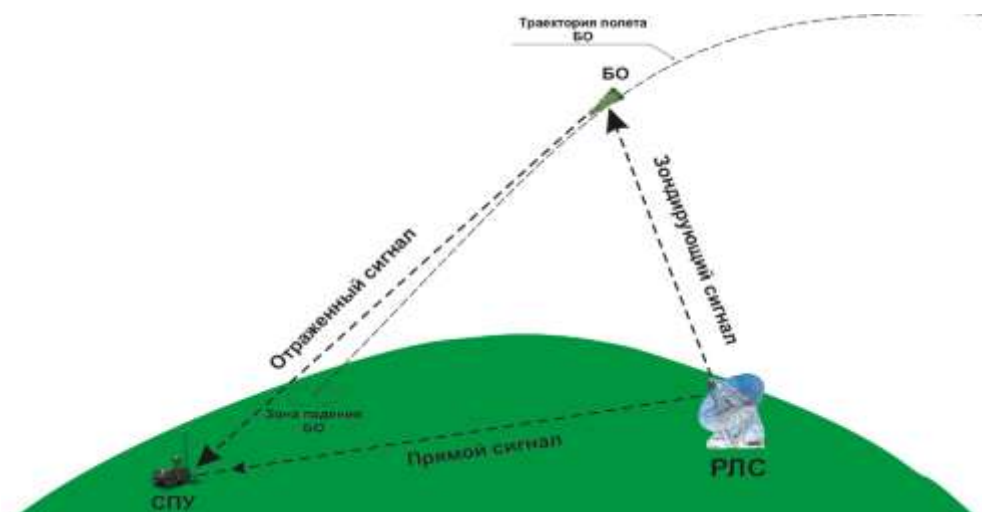


Рис. 1. Принцип работы СПУ по сигналам наземного НИИ

СПУ могут иметь двухканальную структуру [6]. В отдельном приемном канале, называемом каналом прямого сигнала, производится оценка неизвестных параметров сигнала. Данный канал работает по прямым сигналам наземного НИИ, принимаемым по боковым лепесткам ее диаграммы направленности. Полученная информация используется для оптимизации приема отраженного от БО сигнала в так называемом канале отраженного сигнала. Структура СПУ, реализующего корреляционную обработку, приведена на рис. 2.

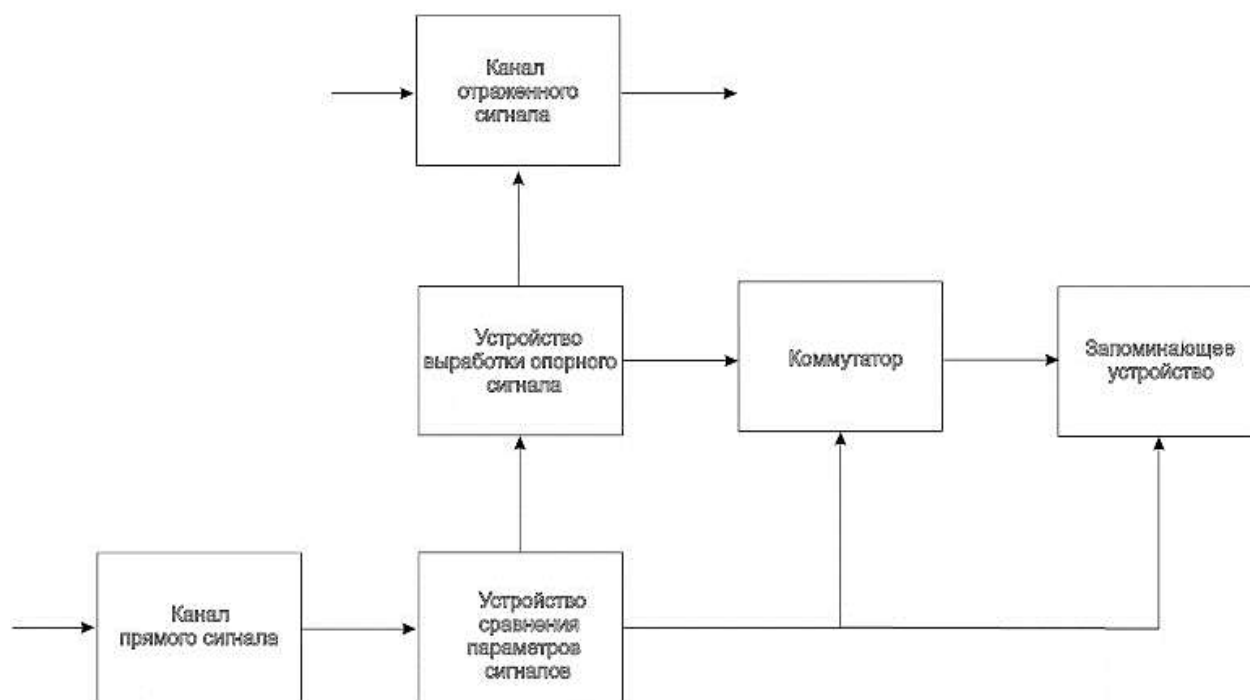


Рис. 2. Структура СПУ

В канале прямого сигнала оцениваются параметры сигнала наземного НИИ, энергетика которого может быть обеспечена достаточно высокой. Оценка сравнивается с параметрами опорного сигнала, а полученный в результате сравнения сигнал ошибки используется для подстройки опорного сигнала под принятый. Так как отраженные сигналы приходят с задержкой, то необходимо сохранить информацию о сигнале ошибки в устройстве памяти. При приеме отраженного от БО сигнала опорный гетеродин формирует сигнал, параметры которого согласованы с параметрами ожидаемого сигнала [3, 6].

Первоочередной задачей для любых радиолокационных станций (РЛС) является оценка зоны обнаружения. Зоной обнаружения РЛС называется та часть пространства, в пределах которой РЛС обнаруживает цели с определенной отражающей поверхностью с заданными вероятностями правильного обнаружения и ложной тревоги и измеряет координаты за определенное время с точностью не хуже заданной. В отличие от совмещенной РЛС и станций радиотехнической разведки, значение максимальной дальности обнаружения БО СПУ не определяется однозначно энергетическим потенциалом [6, 7]. При различных взаимных положениях БО, наземного НИИ и СПУ, и при одном и том же энергетическом потенциале значения максимальной дальности обнаружения будут различными.

При определении зоны обнаружения СПУ на **первом этапе** необходимо определить максимальную дальность обнаружения прямого сигнала наземного НИИ каналом прямого сигнала СПУ. Максимальная дальность обнаружения прямого сигнала наземного НИИ будет являться максимально допустимой базой разнесенной системы. Максимальное значение базы b_{\max} определяется из выражения

$$b_{\max} = \begin{cases} D_{\text{пр}}, & \text{если } D_{\text{пр.вид}} \\ D_{\text{пр.вид}}, & \text{в других случаях} \end{cases}, \quad (1)$$

где $D_{\text{пр}}$ – максимальная дальность обнаружения прямого сигнала наземного НИИ каналом прямого сигнала СПУ;

$D_{\text{пр.вид}}$ – дальность прямой видимости.

Как следует из (1) для выбора местоположения СПУ необходимо определить дальность обнаружения прямого сигнала наземного НИИ и сравнить его с дальностью прямой видимости.

Дальность обнаружения прямого сигнала наземного НИИ определяется из выражения [8]:

$$D_{\text{пр}} = \left[\frac{P_t G_t G_{\text{б.л.}} G_r \lambda^2 \eta_{\text{тр}}}{4\pi P_{r \min \text{пр}}} |p|^2 \right]^{0.5}, \quad (2)$$

где $D_{\text{пр}}$ – расстояние от наземного НИИ до приемного устройства;

P_t – мощность передатчика наземного НИИ;

G_t – коэффициент усиления передающей антенны наземного НИИ;

$G_{\text{б.л.}}$ – уровень боковых лепестков диаграммы направленности передающей антенны наземного НИИ в направлении на СПУ;

G_r – коэффициент усиления антенны канала прямого сигнала СПУ;

λ – длина волны наземного НИИ;

$P_{r \min \text{пр}}$ – чувствительность канала прямого канала СПУ;

$\eta_{\text{тр}}$ – коэффициент потерь на участке наземный НИИ – СПУ;

$|p|^2$ – коэффициент потерь в отношении сигнал-шум из-за априорной неопределенности параметров зондирующего сигнала наземного НИИ.

Если параметры сигнала известны с точностью до закона распределения, то коэффициент $|p|^2$ определяется следующим отношением:

$$|p|^2 = \int_{-\infty}^{\infty} P(\vec{\alpha}) |p(\vec{\alpha})|^2 d\vec{\alpha}. \quad (3)$$

Здесь α – вектор параметров рассогласования спектра сигнала и частотной характеристики СПУ;

$P(\alpha)$ – плотность распределения α с дисперсией σ_{α}^2 ,

$$|p(\vec{\alpha})|^2 = \frac{\left| \int_{-\infty}^{\infty} g(f, \vec{\alpha}) \cdot K(f) e^{j2\pi f t_m} df \right|^2}{\int_{-\infty}^{\infty} |K(f)|^2 \cdot df \int_{-\infty}^{\infty} |g(f, \vec{\alpha})|^2 df}, \quad (4)$$

где $g(f, \vec{\alpha})$ – спектр сигнала;

$K(f)$ – частотная характеристика СПУ;

t_m – момент наблюдения.

Реальная чувствительность канала прямого сигнала $P_{c \min \text{пр}}$ СПУ определяется выражением

$$P_{c \min \text{пр}} = P_{\text{ш}} q_{\text{оп}}^2 = kT_0 K_u \Delta f_{\text{пр}} q_{\text{пор}}^2. \quad (5)$$

где k – постоянная Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/град;
 T_0 – абсолютная температура в градусах Кельвина, $T_0 = 290^\circ\text{К}$;
 $K_{\text{ш}}$ – коэффициент шума приемного устройства;
 $\Delta f_{\text{пр}}$ – ширина полосы пропускания СПУ.

При этом необходимо учитывать, что СПУ должно иметь полосу пропускания на 15–25% больше ширины спектра обрабатываемого сигнала [9, 10]. Для приемлемых вероятностей правильного обнаружения $D = 0,9$ и ложной тревоги $F = 10^{-7}$ при обнаружении сигнала со случайной начальной амплитудой и начальной фазой, реальная чувствительность СПУ должна составлять не менее $10^{-11} - 10^{-12}$ Вт [3, 6].

На плоскости зона обнаружения прямого сигнала СПУ представляет собой окружность радиусом $D_{\text{пр}}$. Чтобы обеспечить прием прямого сигнала наземного НИИ, он должен находиться внутри этой окружности. Нужно отметить, что значение величины $D_{\text{пр}}$, кроме прочих факторов, определяется степенью согласования СПУ прямого сигнала непосредственно с сигналом.

Дальность прямой видимости можно определить, используя следующее выражение [7, 11]:

$$D_{\text{пр.вид}} = 4,12(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) + 46,5\sqrt[3]{\lambda}, \quad (6)$$

где h_1 и h_2 – высоты антенн наземного НИИ и канала прямого сигнала СПУ в метрах, отсчитываемые с учетом рельефа местности. Если одна из этих высот более 1000 м, то расчет производится без учета слагаемого $46,5\sqrt[3]{\lambda}$.

Зная энергопотенциал наземного НИИ, чувствительность СПУ канала прямого сигнала и высоты передающей антенны наземного НИИ, а также антенны канала прямого сигнала СПУ, можно определить точку размещения СПУ относительно наземного НИИ. Проведенные расчеты показывают, что максимальное удаление от наземного НИИ определяется дальностью прямой видимости и при высоте антенн 40 м составляет около 50 км.

Вторым этапом при определении зоны обнаружения СПУ является определение области пространства, в пределах которой обеспечивается прием отраженного от излучающего БО сигнала наземного НИИ с заданными показателями качества при условии их прямой видимости.

Кривая, ограничивающая сечение зоны обнаружения канала отраженного сигнала плоскостью, определяется выражением [1, 2]

$$(D_1 D_2)_{\text{max}} = \frac{\lambda}{4\pi} \left[\frac{P_t G_t \sigma(\gamma) G_{r1} \eta_{\text{т}} \eta_{\text{п}}}{P_{r \text{ min отр}}} |p|^2 \right]^{0.5}, \quad (7)$$

где D_1 – расстояние от наземного НИИ до излучающего БО;
 D_2 – расстояние от излучающего БО до СПУ;
 λ – длина волны наземного НИИ;
 $\sigma(\gamma)$ – эффективная отражающая поверхность излучающего БО;
 G_{r1} – коэффициент усиления антенны канала отраженного сигнала СПУ;
 $\eta_{\text{т}}$ – коэффициент потерь на участке от наземного НИИ до излучающего БО;
 $\eta_{\text{п}}$ – коэффициент потерь на участке от наземного НИИ до СПУ;
 $P_{r \text{ min отр}}$ – чувствительность канала отраженного сигнала СПУ;
 $|p|^2$ – коэффициент потерь в отношении сигнал-шум из-за априорной неопределенности параметров зондирующего сигнала наземного НИИ для корреляционных приемных устройств составляет 3 дБ. Обоснование выбора такой величины приводится в [6].

В выражение (7) входит эффективная площадь рассеяния (ЭПР) БО $\sigma(\gamma)$. В многопозиционной радиолокации она будет отличаться от ЭПР БО для совмещенных радиолокаторов. В работе [7] показано, что при возрастании угла γ между направлениями облучения и приема ЭПР БО возрастает и определяется следующими выражениями:

$$\sigma(\gamma) = \sigma(0) \left[1 + \exp \left[n|\gamma| - (2,4n+1) \right] \right],$$

$$\gamma = \arccos \left[\frac{1}{2D_1D_2} (R1^2 + R2^2 - b^2) \right], \text{рад.} \quad (8)$$

где n – эмпирический коэффициент, определяемый конфигурацией и сложностью отражающего объекта, $n = 7 \div 10$.

Анализ приведенных в [12] зависимостей ЭПР от бистатического угла позволяет сделать вывод о том, что при превышении значения угла $\gamma < 135^\circ$, наблюдается резкий рост ЭПР БО $\sigma(\gamma)$. Для меньших углов γ изменения ЭПР являются незначительными.

Используя кривые и зная чувствительность канала отраженного сигнала, можно определить зону обнаружения СПУ.

Построение графика зависимости $f(D_1D_2)$ сводится к построению овалов Кассини [12], уравнение которого в декартовых координатах имеет вид

$$y(x) = \pm \sqrt{\sqrt{(R_1 \cdot R_2)^2 + 4(D \cdot x)^2} - x^2 - D^2}, \quad (9)$$

где D – базовое расстояние между приемным пунктом и наземным НИИ.

Расчеты выполнены для заданной вероятности правильного обнаружения БО в соответствии с техническими характеристиками наземных НИИ, приведенными в табл. 1.

Таблица 1

**Основные тактико-технические характеристики иностранных РЛС
дальнего обнаружения (наземные НИИ)**

Параметр	Наименование РЛС			
	РЛС № 1	РЛС № 2	РЛС № 3	РЛС № 4
Диапазон частот, МГц	1300–1500 2900–3100	5400–5900	120–160 400–460	8500–10000
Излучаемая мощность, МВт	4/0,3	4/0,08	10/0,1	8/0,1
Импульсная мощность / средняя	4/0,1		20/0,1	
Ширина диаграммы направленности, град	0,75 0,35	0,33	2,68 0,96	-
Диаметр антенны, м	25,6	12,2	45,7	12
Частота повторения импульсов, Гц	100–2350	35–200	14–3000	-
Дальность обнаружения по цели с ЭПР = 1 м ² , км	3200	4500	8000	2000
Период повторения импульсов, мкс	666–6000	4920–29400	330–11600	-
Длительность излучаемых импульсов, мкс	2–50	1–20	0,5–40	600

В соответствии с тактико-техническими характеристиками иностранных РЛС дальнего обнаружения, приведенными в табл. 1, при разных значениях базы между наземным НИИ и СПУ, чувствительности СПУ и ЭПР БО на рис. 3 показаны расчетные зоны, в которых с заданными показателями осуществляется обнаружение БО, при условии некогерентной обработки сигналов от РЛС № 1 [13].

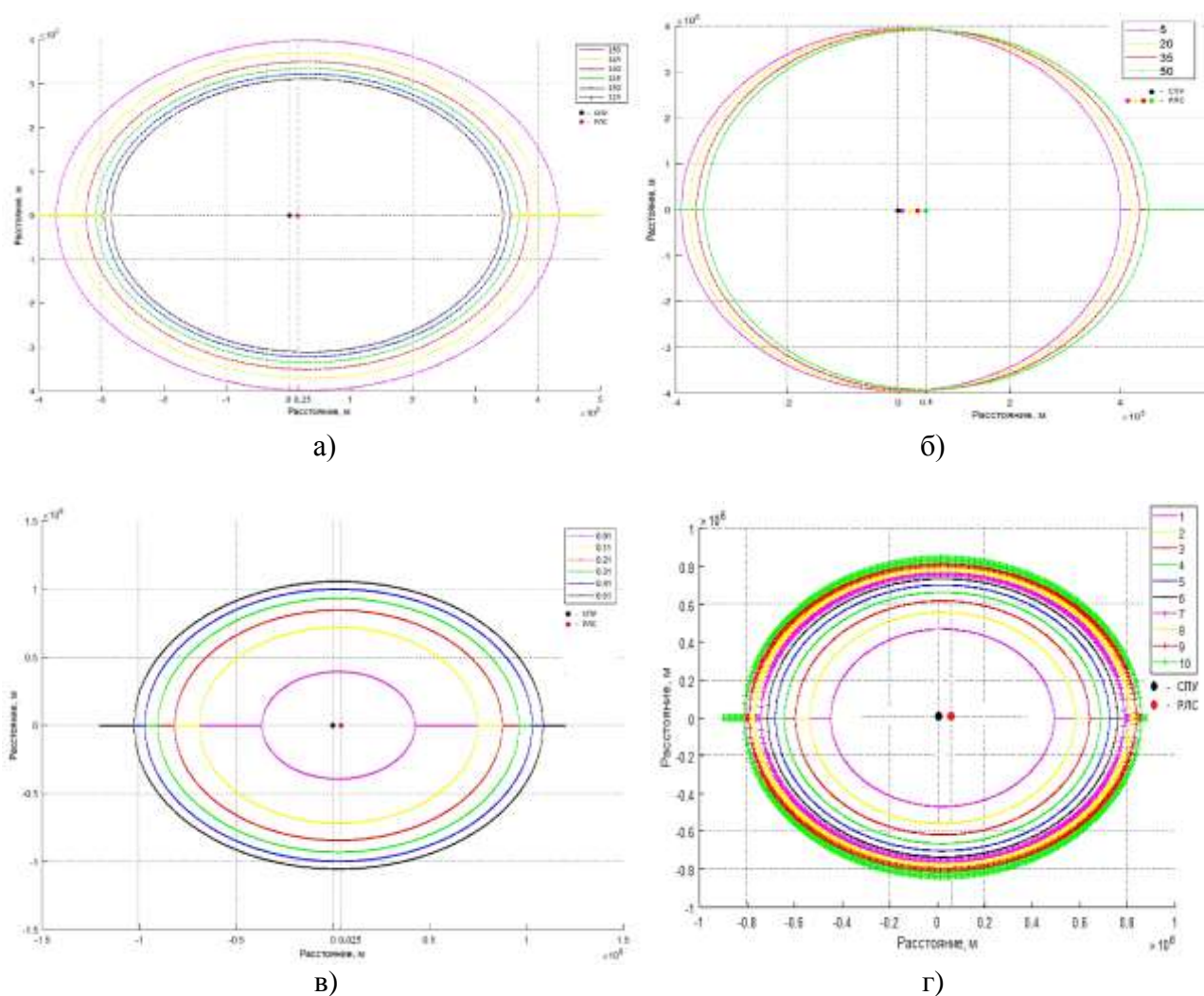


Рис. 3. Зона обнаружения разнесенной системы по сигналам РЛС № 1:
 а – при разных значениях чувствительности СПУ; б – при разных значениях базового расстояния; в – при разных значениях ЭПР БО, m^2 ; г – при разных значениях сигнала/шума

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, основным фактором, влияющим на выбор позиции СПУ, является дальность обнаружения прямого зондирующего сигнала наземного НИИ. При работе по сигналам наземного НИИ расположение СПУ целесообразно выбирать на дальности 40–50 км от нее для выполнения условия прямой видимости.

Дальность обнаружения излучающих БО определяется, в первую очередь, энергетическим потенциалом СПУ и параметрами бортовой радиоэлектронной аппаратуры БО, а также энергетическим потенциалом разнесенной системы, образованной наземным НИИ и СПУ.

Список используемых источников

1. *Аверьянов В. Я.* Разнесенные радиолокационные станции и системы. – Минск : Наука и техника, 1978. – 184 с.
2. Многопозиционные радиотехнические системы / под ред. В. С. Кондратьева, А. Ф. Котова, Л. Н. Маркова. – М. : Радио и связь, 1986. – 264 с.
3. *Перунов Ю. М., Куприянов А. И.* Радиоэлектронная борьба: радиотехническая разведка. – 4-е изд. – М. : Вузовская книга, 2019. – 190 с.
4. *Цыбульник А. Н., Чернов А. Ю., Володин Р. С.* Пути расширения информационных возможностей национальных технических средств контроля финишных районов испытательных ракетных полигонов // Вопросы оборонной техники. Сер. 16: Технические средства противодействия терроризму. – 2020. – № 11-12. – С. 15–21.
5. *Сколник М. И.* Справочник по радиолокации : в 2 кн. – М. : Техносфера, 2014. – Кн. 2. – 680 с.
6. *Лешко Н. А., Цыбульник А. Н.* Радиотехническая разведка и скрытная радиолокация: монография. – Ярославль : ЯрГПУ им. К.Д. Ушинского, 2006. – 152 с.
7. *Алмазов В. Б.* Основы теории радиолокации. – Харьков : ВИРТА им. Л. А. Говорова, 1992. – 204 с.
8. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория: справочник / Я. Д. Ширман [и др.]; под ред. Я. Д. Ширмана. – М. : ЗАО МАКВИС, 1998. – 828 с.
9. Радиоприемные устройства / А. П. Жуковский [и др.]; под ред. А. П. Жуковского. – М. : Высш. шк., 1989. – 344 с.
10. Теория и техника генерирования излучения и приема радиолокационных сигналов / Н. Г. Батулин [и др.]; под ред. Ю. Н. Седышева. – Харьков : ВИРТА ПВО, 1986. – 320 с.
11. *Мельников Ю. П., Попов С. В.* Радиотехническая разведка. Методы оценки эффективности местоопределения источников излучения. – М. : Радиотехника, 2008. – 432 с.
12. *Черняк В. С.* Многопозиционная радиолокация. – М. : Радио и связь, 1993. – 416 с.
13. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2021611013. Программа для оценки энергетических характеристик разнесенной радиолокационной системы с кооперируемым (некооперируемым) источником подсвета / Р. С. Володин. – Заявл. 11.01.2021; зарегистр. 20.01.2021.

А. М. Голик*,
доктор технических наук, профессор;

Э. Р. Дашкин**,
кандидат технических наук;

Д. В. Сергеев**,
кандидат технических наук;

Ю. А. Шишов*,
доктор технических наук, профессор

*Санкт-Петербургский военный ордена Жукова институт войск национальной гвардии, г. Санкт-Петербург.

**Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург.

СИСТЕМА КОРРЕКЦИИ ИСКАЖЕНИЙ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЯ НА АПЕРТУРЕ ЦИФРОВОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

Предлагается система коррекции искажений амплитудно-фазового распределения на апертуре цифровой антенной решетки, обусловленных влиянием снежного и ледяного покрытий. Повышение точности коррекции искажений амплитудно-фазового распределения основано на том, что при формировании эталонных значений комплексных амплитуд исключаются погрешности расчетного способа, связанные с неточным знанием форм диаграммы направленности вспомогательной антенны и излучателей цифровой антенной решетки, расстояний между их фазовыми центрами, а также с неучитываемым влиянием переотражений электромагнитной волны от поверхности земли и местных предметов.

Ключевые слова: цифровые антенные решетки, амплитудно-фазовое распределение, эксплуатация локационных систем, снежное и ледяное покрытия.

ВВЕДЕНИЕ

Цифровые антенные решетки (ЦАР) являются неотъемлемой составляющей современных локационных систем. Образование снежного и ледяного покрытий на апертуре ЦАР неизбежно приводит к искажениям амплитудно-фазового распределения (АФР) поля, и как следствие, к существенному снижению характеристик локационных систем [1–3]. Устранение указанных искажающих факторов механическим путем зачастую не представляется возможным. Проведенный в работе [4] анализ показал, что влияние таких климатических факторов, как образование снежного и ледяного покрытия на апертуре ЦАР, приводит к искажению АФР поля, что, в свою очередь, обуславливает снижение уровня излучаемой и принимаемой мощности.

В данной статье предлагается вариант структуры системы коррекции искажений АФР поля на апертуре ЦАР, обусловленных влиянием искажающих факторов (снежного и ледяного покрытий), отличающийся от ранее известных простотой реализации и более высокой точностью коррекции.

К УЧЕТУ ВЛИЯНИЯ ИСКАЖАЮЩИХ ФАКТОРОВ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЯ НА АПЕРТУРЕ ЦИФРОВОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

Наличие внешних искажающих факторов (снежного и ледяного покрытия) в общем случае приводит к искажениям АФР поля на апертуре антенны, вызванным ослаблением отраженной от рефлектора волны и изменением фазовых соотношений между прямой и отраженной

от рефлектора волнами. В свою очередь эти факторы определяются комплексной диэлектрической проницаемостью снега (льда) [5] и [6].

Как показано в работе [4] оценка влияния снежного и ледяного покрытий на искажения АФР поля предполагает выполнение следующих операций.

1. Сформировать исходные данные, а именно определить:
 - длину волны λ (несущая частота f);
 - протяженность участков l_1 и l_2 (l_1 – снег (лед), l_2 – воздух), $l_1 + l_2 = \lambda / 4$;
 - действительную ε'_r и мнимую ε''_r части комплексной диэлектрической проницаемости снега (льда) на частоте f и влажности W [6].
2. Вычислить тангенс угла электрических потерь.
3. Вычислить коэффициент ослабления волны в слое снега (льда).
4. Вычислить амплитуду отраженной от экрана волны.
5. Вычислить коэффициент фазы β_1 при прохождении волны через слой снега (льда).
6. Вычислить набег фазы на участке l_1 по формуле $\Delta\varphi_1 = -2\beta_1 l_1$,
7. Вычислить коэффициент фазы на участке l_2 .
8. Вычислить набег фазы на участке l_2 по формуле $\Delta\varphi_2 = -2\beta_2 l_2$.
9. Вычислить полный набег фазы на участках l_1 и l_2 с учетом скачкообразного изменения фазы на 180° при отражении волны от идеально проводящего экрана.
10. Вычислить модуль комплексной огибающей результирующего сигнала.
11. Оценить относительное снижение амплитуды напряженности электрического поля излучателя ЦАР:

$$\delta E_\Sigma = \frac{E_\Sigma}{2E_0} \quad (1)$$

и относительное снижение излучаемой и принимаемой мощности:

$$\delta P_{изл} = \delta P_{пр} = (\delta E_\Sigma)^2. \quad (2)$$

12. Вычислить начальную фазу излучаемого приемно-передающего модуля (ППМ) сигнала.

Приводятся результаты расчетов предложенного алгоритма (рис. 1) для двух ЦАР дециметрового диапазона с длиной волны $\lambda = 0,1$ м ($f = 3 \cdot 10^9$ Гц) и $\lambda = 0,25$ м ($f = 10^9$ Гц), в качестве излучателей которых применяются полуволновые вибраторы, параллельные металлическому экрану (полотну ЦАР), на расстоянии $d = \lambda / 4$.

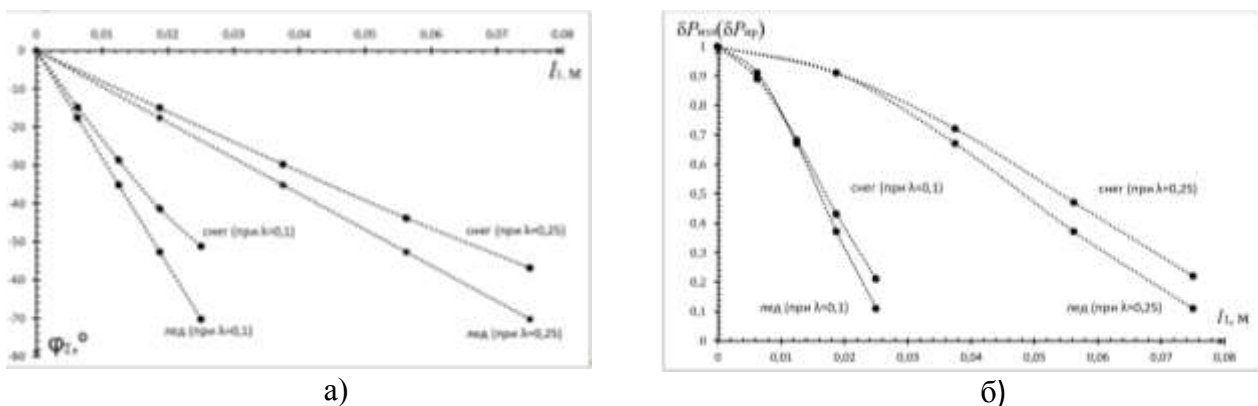


Рис. 1. Оценка влияния снежного и ледяного покрытия на искажения АФР поля:
 а – зависимость начальной фазы комплексной огибающей от величины l_1 ;
 б – зависимость относительного снижения излучаемой и принимаемой мощности от величины l_1

На основании расчетных данных (рис. 1) делаются следующие выводы:

1) наличие снега и льда между вибратором и экраном существенно снижает относительную мощность излучения $\delta P_{\text{изл}}$ и приема $\delta P_{\text{пр}}$;

2) компенсация снижения мощности излучения и приема возможна только за счет соответствующего увеличения коэффициентов передачи усилителя мощности и малошумящего усилителя ПШУ. Поэтому степень допустимого снижения мощности излучения и приема, а следовательно, допустимой величины снежного и ледяного покрытий между вибратором и экраном следует определять в соответствии с техническими возможностями повышения коэффициентов передачи указанных усилителей;

3) наличие снежного и ледяного покрытия между вибратором и экраном приводит к значительному искажению фазового распределения поля на апертуре ЦАР в режиме излучения и приема, о чем свидетельствуют значения суммарной фазы φ_{Σ} . Эти искажения дополнительно снижают мощность излучения и приема за счет снижения коэффициента усиления антенны в режиме передачи и эффективной площади антенны в режиме приема. Для коррекции фазового распределения необходимо при формировании диаграммы направленности (ДН) учитывать значения φ_{Σ} как начальную фазу возбуждения соответствующего ПШУ.

В соответствии с приведенными выводами разработка системы коррекции искажений амплитудно-фазового распределения поля на апертуре цифровой антенной решетки представляется актуальной научно-технической задачей.

СТРУКТУРА СИСТЕМЫ КОРРЕКЦИИ ИСКАЖЕНИЙ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЯ НА АПЕРТУРЕ ЦИФРОВОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

Структура предлагаемой системы коррекции искажений АФР иллюстрируется чертежами на рис. 2 и рис. 3.

Приемный модуль (рис. 2) выполнен по типовой супергетеродинной схеме и содержит в своем составе i -й излучатель ($i \in 1, N$, где N – число элементов антенной решетки), малошумящий усилитель МШУ, смеситель СМ, усилитель промежуточной частоты УПЧ, квадратурный демодулятор КДМ.

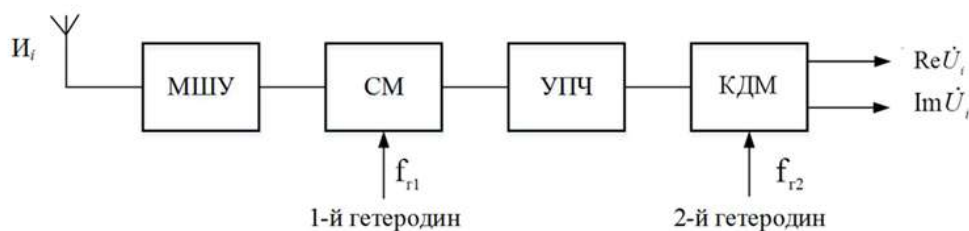


Рис. 2. Приемный модуль ЦАР

В настоящее время цифровые устройства способны обрабатывать СВЧ сигналы на несущей частоте, поэтому часто приемные устройства строят без преобразования частоты. Такое решение, во-первых, упрощает и удешевляет каждый приемный модуль, число которых в составе ЦАР измеряется тысячами штук, и сложность и стоимость самой активной ФАР, а во-вторых, без частотного преобразования значительно, по крайней мере, на два порядка, повышается потенциальная разрешающая способность РЛС по дальности. Это объясняется тем, что разрешающая способность по дальности определяется шириной спектра зондирующего сигнала не более 10% от значения частоты несущего колебания (в данном случае – промежуточной частоты), которая и ограничивает возможность расширения спектра зондирующего сигнала.

В состав предлагаемой системы коррекции искажений АФР поля на апертуре ЦАР (рис. 3) кроме корректируемых приемных модулей (ПМ-1...ПМ- N) с излучателями (И-1...И- N) входят задающий генератор ЗГ, генератор контрольного сигнала ГКС, усилитель мощности УМ с вспомогательной антенной А, блок формирования корректирующих кодов БФКК, постоянное запоминающее устройство ПЗУ, блок коммутации, блок коррекции, система цифрового формирования ДН ЦАР, блок управления БУ, блок формирования корректирующих кодов.

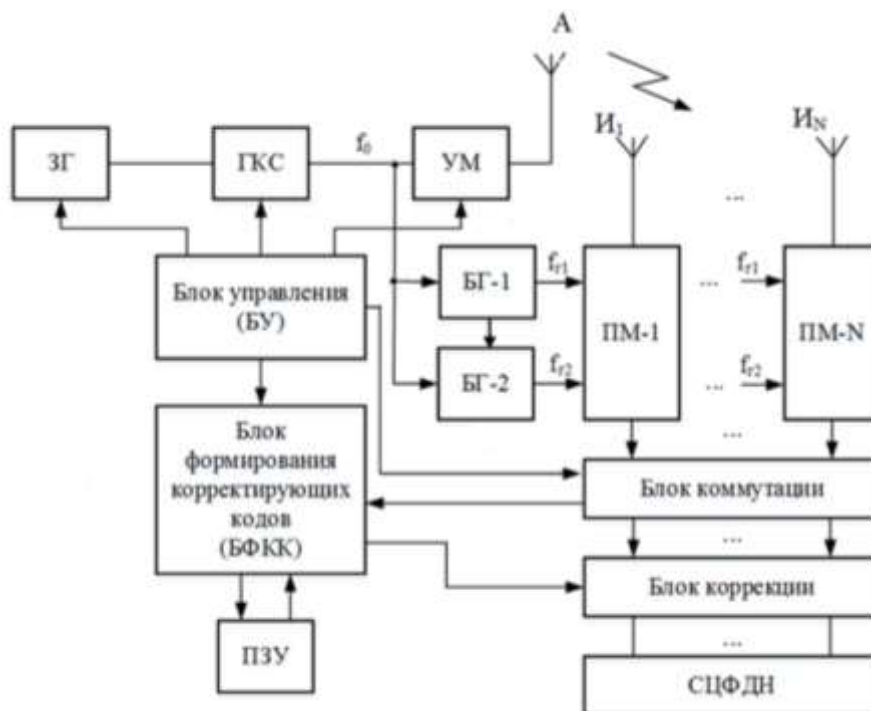


Рис. 3. Структурная схема системы коррекции АФР поля на апертуре ЦАР

Кроме того, в том случае, если приемный модуль построен по классической супергетеродинной схеме, то в состав системы коррекции входят два гетеродинных блока БГ-1 и БГ-2, которые обеспечивают гетеродинным напряжением частотой f_{r1} , смеситель приемного модуля СМ (см. рис. 2) и опорным напряжением частотой f_{r2} квадратурный демодулятор КДМ (рис. 2). В том случае, если приемный модуль ЦАР построен по схеме прямого усиления, т. е. без частотного преобразования, то в его составе отсутствуют СМ и УПЧ (рис. 2), а в составе системы коррекции (рис. 3) отсутствуют блоки первого и второго гетеродинов. При этом в качестве опорного напряжения КДМ (рис. 2) используют непосредственно колебания ГКС (рис. 3).

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА КОРРЕКЦИИ ИСКАЖЕНИЙ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЯ НА АПЕРТУРЕ ЦИФРОВОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

Предлагаемая система коррекции искажений АФР поля на апертуре ЦАР, обусловленных влиянием климатических факторов, функционирует следующим образом (рис. 3). Блок управления координирует работу основных блоков системы: задающего генератора, генератора контрольных сигналов, усилителя мощности, блока коммутации, блока коррекции, блока формирования корректирующих кодов.

Комплексную огибающую напряжения на выходе i -го усилителя промежуточной частоты (УПЧ) можно представить в виде

$$\dot{U}_i = U_i \cdot e^{j\varphi_i}, \quad (3)$$

где U_i – модуль комплексной амплитуды;

φ_i – фаза напряжения на выходе УПЧ i -го приемного модуля ($i \in 1...N$).

С выхода i -го УПЧ сигнал поступает на вход i -го квадратурного демодулятора, где после аналого-цифрового преобразования выделяются его квадратурные составляющие:

$$\operatorname{Re}\dot{U}_i = U_i \cdot \cos \varphi_i, \quad (4)$$

$$\operatorname{Im}\dot{U}_i = U_i \cdot \sin \varphi_i. \quad (5)$$

Формирование эталонных значений выходных сигналов приемных модулей $\operatorname{Re}\dot{U}_{i\text{эт}}$ и $\operatorname{Im}\dot{U}_{i\text{эт}}$ осуществляется в условиях, когда снежное и ледяное покрытия на элементах апертуры ЦАР отсутствуют. В этом случае блок коммутации в определенном порядке, в соответствии с номерами приемных модулей ($i \in 1...N$), подключает выходы приемных модулей через блок формирования корректирующих кодов ко входу постоянного зондирующего устройства (рис. 3), где они записываются в качестве эталонных значений.

При наличии снежного и ледяного покрытий на элементах апертуры ЦАР осуществляется коррекция искажения АФР поля. При этом текущие значения $\operatorname{Re}\dot{U}_{i\text{тек}}$ и $\operatorname{Im}\dot{U}_{i\text{тек}}$ через блок коммутации поступают на вход блока, где корректирующие коды для каждого приемного модуля формируются в соответствии с соотношением

$$\dot{K}_i = \frac{\dot{U}_{i\text{эт}}}{\dot{U}_{i\text{тек}}}. \quad (6)$$

В результате умножения текущих значений комплексных амплитуд выходных сигналов приемных модулей $\dot{U}_{i\text{тек}}$ на корректирующие коды (6) формируются скорректированные значения выходных текущих сигналов приемных модулей:

$$\dot{U}_{i\text{тек}}^{\text{кор}} = \dot{U}_{i\text{тек}} \cdot \dot{K}_i = \dot{U}_{i\text{тек}} \cdot \frac{\dot{U}_{i\text{эт}}}{\dot{U}_{i\text{тек}}} = \dot{U}_{i\text{эт}}. \quad (7)$$

Полученные значения на основании формулы (7) показывают, что в результате проведенной коррекции выходные сигналы всех приемных модулей равны их эталонным значениям, полученным без влияния климатических факторов. Таким образом восстанавливается АФР поля на апертуре ЦАР, которое имело место в отсутствие снежного и ледяного покрытий на ее апертуре.

В том случае, если приемный модуль ЦАР выполнен по схеме приемника прямого усиления, т. е. без частотного преобразования, в его составе отсутствуют смеситель и УПЧ, а в составе системы коррекции (рис. 3) отсутствуют блоки первого и второго гетеродинов. При этом в качестве опорного напряжения квадратурного демодулятора (рис. 2) используются непосредственно колебания генератора контрольных сигналов.

По окончании процедуры компенсации искажений АФР поля на апертуре ЦАР радиолокационная станция переводится в штатный режим функционирования. При этом скорректированные значения сигналов по формуле (7) со всех выходов блока коррекции поступают в систему цифрового формирования ДН ЦАР, которое осуществляется путем весового суммирования сигналов. В результате формируется ДН антенны, свободная от искажений, обусловленных климатическими факторами в виде снежного и ледяного покрытий на ее апертуре.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты выполненных исследований свидетельствуют о том, что наличие снежного и ледяного покрытий на апертуре ЦАР приводит к существенному снижению относительной мощности излучения и приема (с 1 до 0,2). Предложен и проанализирован вариант структуры системы коррекции искажений АФР поля на апертуре ЦАР, позволяющий восстанавливать требуемое АФР поля на апертуре ЦАР в условиях воздействия указанных искажающих факторов.

Простота эксплуатации достигается тем, что, в отличие от технического решения [3], вспомогательная антенна размещается не в дальней зоне (ближняя граница которой составляет сотни километров), а в зоне Френеля (десятки-сотни метров) с таким расчетом, чтобы апертура контролируемой ЦАР была в пределах главного лепестка ДН вспомогательной антенны.

Повышение точности коррекции искажений АФР основано на том, что при формировании эталонных значений комплексных амплитуд исключаются погрешности расчетного способа, связанные с неточным знанием форм ДН вспомогательной антенны и излучателей ЦАР, расстояний между их фазовыми центрами, а также с неучитываемым влиянием переотражений электромагнитной волны от поверхности земли и местных предметов.

Список используемых источников

1. Влияние снежного покрытия на характеристики излучения рефлекторных антенн / О. И. Сухаревский [и др.] // Радиотехника и электроника. – 2015. – Т. 60, № 6. – С. 633–641.
2. Пат. 2233018/20.07.2004 Российская Федерация. Способ противообледенения наземной параболической антенны и устройство для его решения / Головянкин Е. Н., Халикович П. И., Мелкомуков А. А. и др. – № 2003125539/09; заявл. 18.08.2003; опубл. 20.07.2004, Бюл. № 20. – 3 с.
3. Пат. 2446521 Российская Федерация, Н01Q3/26. Способ компенсации искажений амплитудно-фазового распределения поля в раскрыве адаптивной антенной решетки, обусловленных влиянием климатических факторов / Д. Д. Габриэльян, А. Г. Прыгунов, А. И. Рахманинов, В. В. Трепачев, В. В. Худяков. – № 2010102939/07; заявл. 28.01.2010; опубл. 27.03.2012, Бюл. № 9. – 4 с.
4. *Сергеев Д. В., Рагимов Э. А., Шишов Ю. А.* Влияние климатических факторов на амплитудно-фазовое распределение поля на апертуре цифровой антенной решетки // Радиопромышленность. – 2021. – Т. 31, № 1. – С. 45–55. – DOI: 10.21778/2413-9599-2021-31-1-45-55.
5. *Боярский Д. А., Мировский В. Г., Тихонов В. В.* Частотно-зависимая модель эффективной диэлектрической проницаемости влажности снега // Радиотехника и электроника. – 1994. – Т. 39, № 10. – С. 1479–1485.
6. *Пименов Ю. В., Волман В. Н., Муравцов А. Д.* Техническая электродинамика. – М.: Радио и связь, 2000. – 536 с.
7. Пат. 2717351 Российская Федерация, G01R29/10/42. Способ компенсации искажений амплитудно-фазового распределения поля в раскрыве адаптивной антенной решетки, обусловленных влиянием климатических факторов / С. Е. Шалдаев, В. В. Подъячев, Ю. А. Шишов, Д. В. Сергеев, М. Г. Вахлов. – № 2019121128; заявл. 07.03.2019; опубл. 23.03.2020, Бюл. № 9. – 4 с.

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

ОБОСНОВАНИЯ ПРИБОРНОГО СОСТАВА И ТРЕБОВАНИЙ К ПОКАЗАТЕЛЯМ ТОЧНОСТИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ СИСТЕМЫ АВТОНОМНОЙ НАВИГАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО РОБОТА

На основе проведенных исследований, выполненных путем математического моделирования, предложены приборный состав и требования к показателям точности средств измерений системы автономной навигации космического робота. Сферой применения космического робота принята совокупность сервисных операций с обслуживаемыми космическими аппаратами.

Представлены результаты исследования точности функционирования системы автономной навигации космического робота при условии, что результаты измерений бортовых средств содержат погрешности, которые распределены по нормальному закону. Характеристики закона распределения погрешностей измерений сохраняют свои значения в течение навигационного сеанса.

Представленные результаты могут быть использованы при выборе облика системы автономной навигации космического робота, предназначенного для решения сервисных задач на орбите, и решении проблемы выбора и обоснования бортовых средств измерений навигационных параметров.

Ключевые слова: космический робот; система автономной навигации; погрешности средств измерений; требования к показателям точности; математическое моделирование

ВВЕДЕНИЕ

Для решения задач, связанных с проведением сервисных операций на космических аппаратах в процессе их орбитального полета, повышенный интерес проявляется к достижениям в области космической робототехники [1–3]. Исследования, проведенные в работах [2, 4], показали, что к сервисным операциям орбитального обслуживания, выполняемого космическими роботами (КР), относятся диагностика и устранение отказов и повреждений, корректировка параметров орбиты космического аппарата (КА), замена источников питания бортовой аппаратуры КА, пополнение запасов топлива и других расходных жидкостей.

Для реализации операций обслуживания КА бортовой комплекс управления КР оснащается системой навигации. Одной из проблем, возникающих при разработке системы навигации КР, является обоснование ее приборного состава и требований, предъявляемых к точности проведения навигационных измерений.

Система навигации КР может базироваться на измерениях, выполняемых наземным комплексом управления, и на бортовых измерениях параметров движения спутников глобальной навигационной спутниковой системы (ГЛОНАСС). Параметры орбиты КР, определяемые средствами наземного комплекса управления или по сигналам ГЛОНАСС [5–8], характеризуются, с одной стороны, высокой точностью решения навигационной задачи, а с другой стороны, недостаточной автономностью [9, 10] и помехозащищенностью [11]. Теоретические исследования, посвященные возможности применения систем автономной навигации (САН) для определения параметров движения центра масс КР, представлены в работах [12–15].

Целью статьи являются представление результатов исследований, полученных методом математического моделирования, обоснование приборного состава и требований к показателям точности средств измерений САН КР.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Основными функциональными частями САН КР являются средства измерений навигационных параметров и бортовой навигационный вычислитель с соответствующим программным обеспечением, который может быть совмещен с бортовым цифровым вычислительным комплексом КР. В соответствии с поставленной целью выполним обоснование приборного состава и требований к показателям точности средств измерений САН КР путем математического моделирования процесса решения навигационной задачи.

Движение КР и обслуживаемого КА (ОКА) рассмотрим в центральном гравитационном поле Земли на геостационарной орбите (ГСО). Такое допущение является вполне оправданным для ГСО, где расстояние от центра КА до центра Земли составляет 42164 км, а относительное расстояние между КР и ОКА мало (менее 10 км).

Введем опорные и истинные орбиты КР и ОКА. Параметры опорных орбит в момент времени t характеризуются векторами $\mathbf{Q}_{\text{КР}o}(t)$ и $\mathbf{Q}_{\text{ОКА}o}(t)$, компоненты которых хранятся в памяти бортового вычислителя КР и при необходимости корректируются с помощью САН КР или наземных средств. Вектор $\mathbf{Q}_{\text{КР}}(t)$ параметров истинного движения КР отличается от опорного вектора $\mathbf{Q}_{\text{КР}o}(t)$ на вектор $\mathbf{q}(t)$, т. е. $\mathbf{Q}_{\text{КР}}(t) = \mathbf{Q}_{\text{КР}o}(t) + \mathbf{q}(t)$.

Будем полагать, что ОКА движется по опорной геостационарной орбите, т. е. справедливо равенство $\mathbf{Q}_{\text{ОКА}o}(t) = \mathbf{Q}_{\text{ОКА}}(t)$, где $\mathbf{Q}_{\text{ОКА}}(t)$ – вектор параметров истинного движения ОКА. Предположим, что опорные орбиты КР и ОКА являются круговыми орбитами, радиусы которых равны r_j ($j = \overline{1, 2}$), где r_1 – радиус орбиты КР и r_2 – радиус орбиты ОКА.

Средства измерений, входящие в САН КР, содержат неизбежные случайные погрешности. Предположим, закон распределения погрешностей результатов навигационных измерений бортовыми средствами КР известен, а его параметры не изменяют свои значения в течение навигационного режима САН КР.

Для обработки измерительной информации выбран один из статистических методов, приведенных, например, в монографии [9].

Результатом решения навигационной задачи бортовой аппаратурой КР является оценка $\hat{\mathbf{q}}(t)$ вектора $\mathbf{q}(t)$, которая получена путем статистической обработки навигационных измерений, т. е. в качестве искомого вектора САН КР выступает вектор $\hat{\mathbf{Q}}_{\text{КР}}(t) = \mathbf{Q}_{\text{КР}o}(t) + \hat{\mathbf{q}}(t)$.

С целью достижения большей наглядности выводов воспользуемся подвижной орбитальной системой координат xuz , начало которой (точка O) совпадает с положением КР на его опорной орбите.

Ось Ox (радиальная ось) является продолжением радиуса-вектора, характеризующего положение КР на его опорной орбите в абсолютной геоцентрической системе координат XYZ (рис. 1).

Ось Oy (трансверсальная ось) перпендикулярна оси Ox и лежит в плоскости опорной орбиты КР.

Ось Oz (боковая ось) перпендикулярна плоскости опорной орбиты КР и дополняет подвижную систему координат xuz до правой.

Тогда вектор $\mathbf{q}(t)$ в подвижной орбитальной системой координат xuz запишем в виде

$$\mathbf{q}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{r}(t) \\ \mathbf{v}(t) \end{bmatrix},$$

где $\mathbf{r}(t)$ – радиус-вектор КР, $\mathbf{r}(t) = [x(t) \ y(t) \ z(t)]^T$;

$\mathbf{v}(t)$ – вектор скорости КР в момент времени t , $\mathbf{v}(t) = [v_x(t) \ v_y(t) \ v_z(t)]^T$.

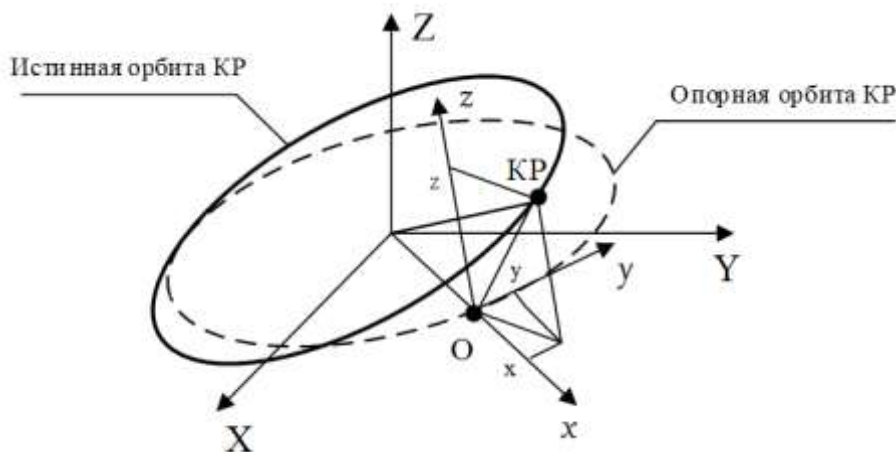


Рис. 1. Подвижная орбитальная система координат

Требуется обосновать, во-первых, необходимый для решения навигационной задачи приборный состав САН КР, движение которого происходит на малом расстоянии относительно ОКА, находящегося на геостационарной орбите, и, во-вторых, требования к показателям точности средств бортовых навигационных измерений, установленных на КР.

ОБОСНОВАНИЕ ПРИБОРНОГО СОСТАВА СИСТЕМЫ АВТОНОМНОЙ НАВИГАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО РОБОТА

Одним из путей решения проблемы обоснования достаточного для решения навигационной задачи состава средств измерений является применение теории наблюдаемости динамических систем, становление и развитие которой произошло благодаря исследованиям, выполненным Р. Т. Калманом [16]. Это понятие, наряду с понятием управляемости, является одним из основных в теории систем. Под наблюдаемостью в задачах космической навигации понимается возможность их решения при выбранном составе измеряемых навигационных параметров.

Теория наблюдаемости движения космических аппаратов получила развитие в работах [17–21]. В частности, в работах [18–20] аналитическим путем доказано, что принципиальная возможность решения навигационной задачи на борту КА по измерениям движения орбитального ориентира с известными элементами его орбиты существует при выполнении ряда условий. В результате исследований установлено, что по измерениям дальности до орбитального ориентира отсутствует принципиальная возможность определения параметров движения центра масс КА. Наблюдаемость движения центра масс КА достигается в том случае, когда бортовыми измеряемыми параметрами являются два угла, которые образованы линиями визирования двух навигационных звезд и направлением на орбитальный ориентир, и дальность до ориентира.

На основании выполненных с помощью теории наблюдаемости движения КА исследований и с учетом поставленной в настоящей работе задачи можно утверждать, что, для определения орбитальных параметров КР в приборный состав его САН должны входить оптико-электронная система (ОЭС), способная измерять углы (Θ_1 и Θ_2) между направлениями на ОКА и расположенными в ее поле зрения двумя навигационными звездами (S_1 и S_2), и средство измерений дальности (ρ), например, лазерный дальномер (ЛД), оптическая ось которого совмещена с направлением на ОКА.

Функциональная схема САН КР изображена на рис. 2.

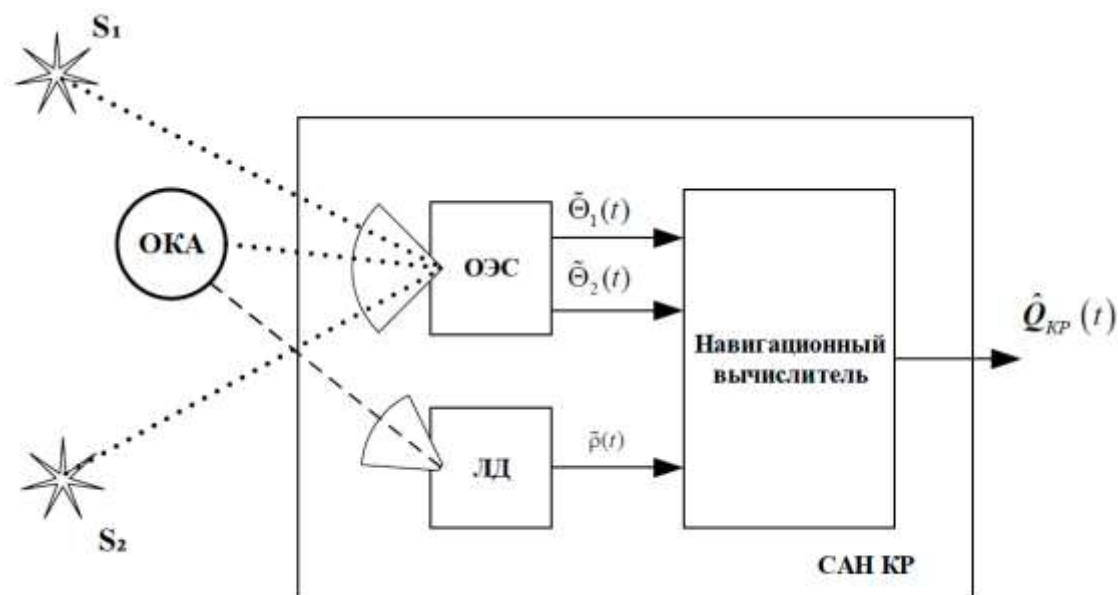


Рис. 2. Функциональная схема САН КР

На рисунке введены следующие обозначения: $\tilde{\Theta}_1(t)$, $\tilde{\Theta}_2(t)$ и $\tilde{\rho}(t)$ – результаты измерений углов (Θ_1 и Θ_2) и дальности (ρ) до ОКА в момент времени t ; $\hat{Q}_{КР}(t)$ – оценка вектора параметров движения КР, соответствующая моменту времени t .

ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ПОКАЗАТЕЛЯМ ТОЧНОСТИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ СИСТЕМЫ АВТОНОМНОЙ НАВИГАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО РОБОТА

Для обоснования требований к показателям точности средств измерений САН КР воспользуемся методом математического моделирования. Введем исходные данные:

- орбитальные параметры движения ОКА соответствуют середине установленной орбитальной позиции ГО, которая имеет долготу λ_0 и размер $\pm\Delta\lambda_0 = \pm 0,05^\circ$;
- опорный вектор параметров движения КР смещен относительно середины орбитальной позиции ОКА по долготе на угол $\Delta\lambda_p = -0,05^\circ$;
- вектор искомых параметров движения КР в подвижной орбитальной системе координат

в момент начала навигационного режима t_0 принят равным $\mathbf{q}(t_0) = \begin{bmatrix} \mathbf{r}(t_0) \\ \mathbf{v}(t_0) \end{bmatrix}$, где

$$\mathbf{r}(t_0) = [1 \quad -1 \quad 1]^T \text{ км}, \quad \mathbf{v}(t_0) = [1 \quad -1 \quad -1]^T \text{ м/с};$$

- погрешности САН КР не должны превышать 0,5 м по координатам и 0,6 мм/с по составляющим скорости;
- продолжительность навигационного режима КР, в течение которого измеряются навигационные параметры, составляет 24 ч;
- количество сеансов измерений в течение навигационного режима равно 1000;
- поле зрения ОЭС составляет 20 град.

Оценим точность работы САН КР при условии, что погрешности результатов измерений углов (Θ_i , где $i = \overline{1, 2}$) и дальности (D) до ОКА распределены по нормальным законам, т. е.

$\xi_{\theta} = N(\Delta_{\theta}, \sigma_{\theta})$ и $\xi_p = N(\Delta_p, \sigma_p)$, где Δ_{θ} и Δ_p – систематические погрешности ОЭС и ЛД, σ_{θ} и σ_p – СКО погрешностей ОЭС и ЛД соответственно.

При проведении исследований будем полагать, что СКО и систематические погрешности ОЭС и ЛД принимают значения соответственно: $\sigma_{\theta} = 0,1', 1,0', 10'$; $\Delta_{\theta} = 0,01', 0,1', 1,0'$; $\sigma_p = 1, 10, 100$ м и $\Delta_p = 0,1, 1, 10$ м.

Для обработки результатов измерений ОЭС и ЛД воспользуемся итерационным МНК, изложенным в работе [10]. Исследования выполним путем анализа установившегося итерационного процесса уточнения координат и составляющих вектора скорости КР при условии, что количество итераций выбрано в диапазоне от 10 до 30.

Результаты исследования влияния СКО погрешностей результатов измерений, выполняемых ОЭС и ЛД при условии отсутствия систематических погрешностей измерений, приведены на рис. 3–7.

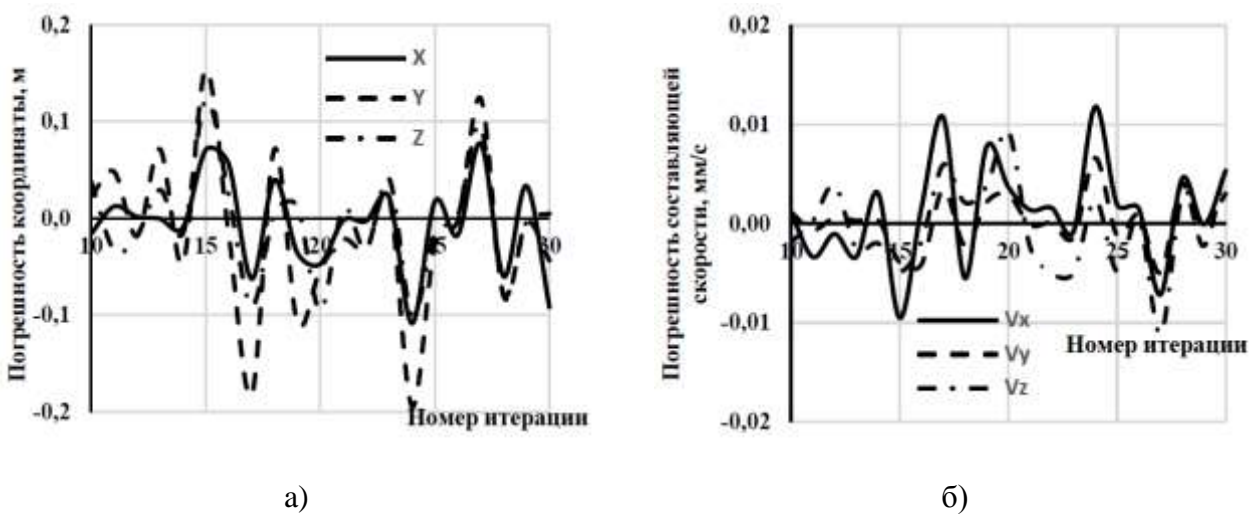


Рис. 3. Графики установившегося итерационного процесса уточнения координат (а) и составляющих вектора скорости (б) КР при $\sigma_{\theta} = 0,1'$ и $\sigma_p = 1$ м

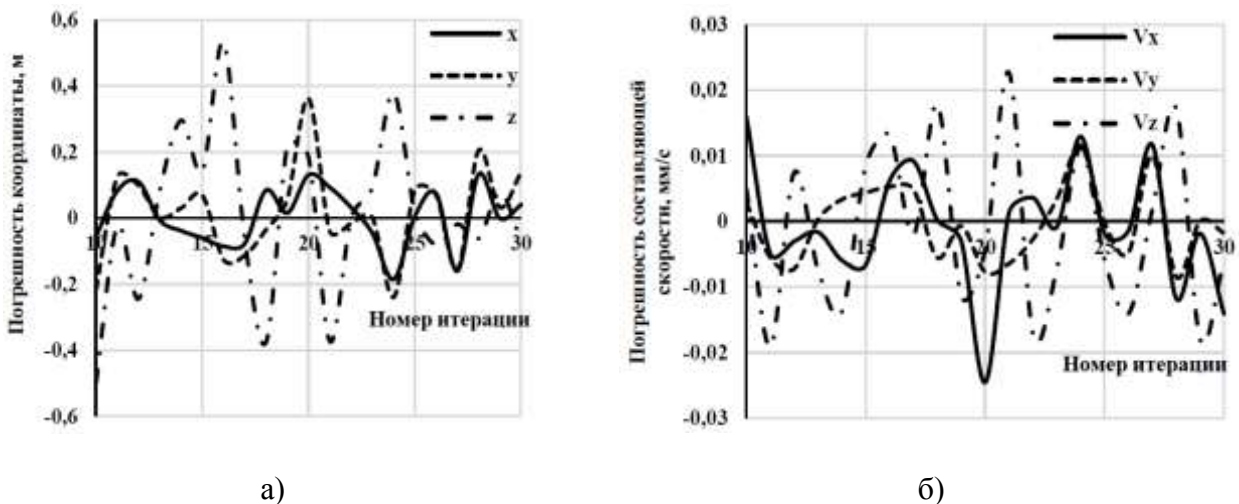


Рис. 4. Графики установившегося итерационного процесса уточнения координат (а) и составляющих вектора скорости (б) КР при $\sigma_{\theta} = 1'$ и $\sigma_p = 1$ м

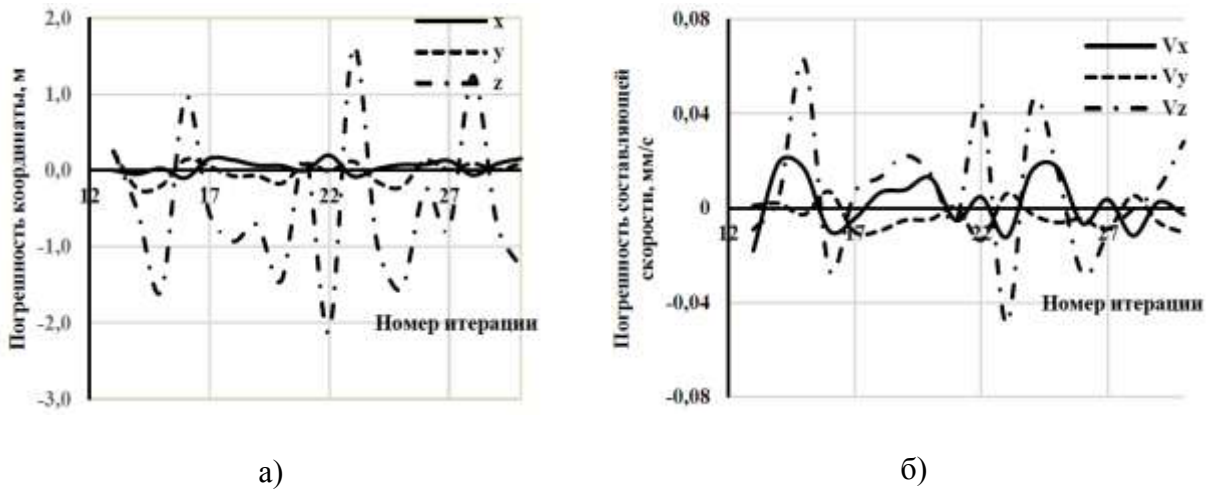


Рис. 5. Графики установившегося итерационного процесса уточнения координат (а) и составляющих вектора скорости (б) КР при $\sigma_\theta = 10'$ и $\sigma_\rho = 1$ м

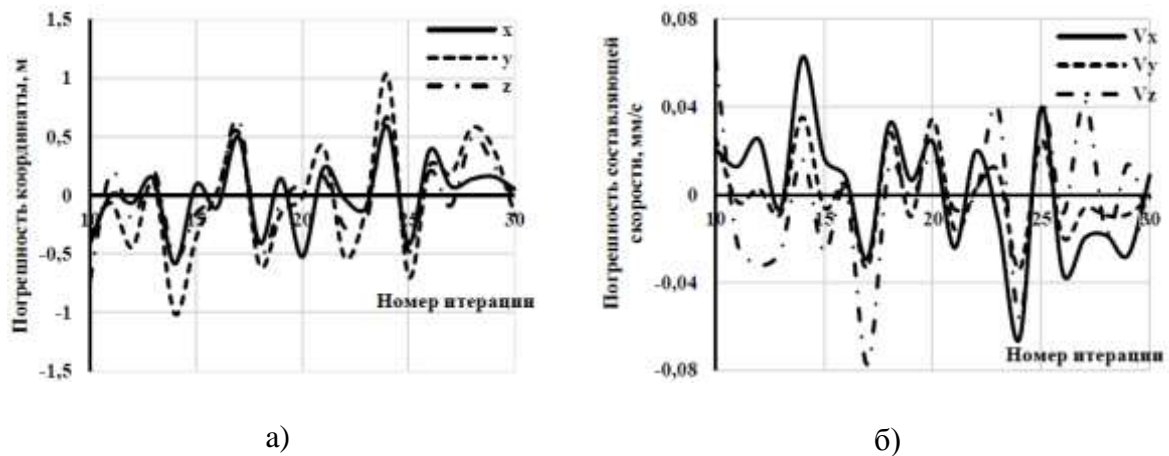


Рис. 6. Графики установившегося итерационного процесса уточнения координат (а) и составляющих вектора скорости (б) КР при $\sigma_\theta = 0,1'$ и $\sigma_\rho = 10$ м

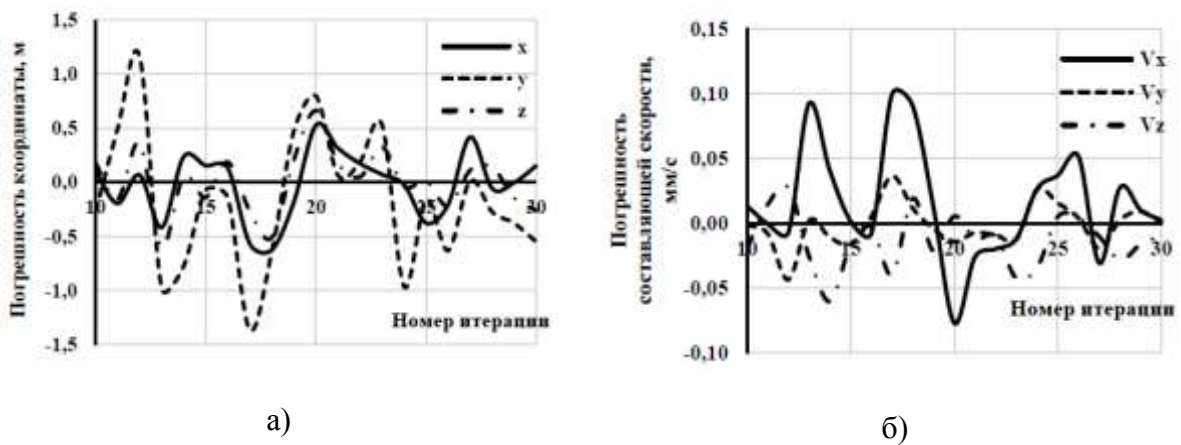


Рис. 7. Графики установившегося итерационного процесса уточнения координат (а) и составляющих вектора скорости (б) КР при $\sigma_\theta = 0,1'$ и $\sigma_\rho = 100$ м

Полученные результаты свидетельствуют о том, что рост СКО погрешностей ЛД при сохранении СКО погрешностей ОЭС на уровне $\sigma_\theta = 0,1'$ приводит к незначительному росту погрешностей навигации КР, преимущественно по трансверсальной координате и радиальной составляющей вектора скорости КР.

С ростом СКО погрешностей ОЭС снижается точность решения исследуемой навигационной задачи. Наибольшему влиянию при этом подвержены боковая координата и составляющая вектора скорости КР.

При использовании ОЭС, у которой СКО погрешности измерений достигает $\sigma_\theta = 10'$, продолжительность итерационного процесса увеличивается. Сходимость итерационного процесса происходит при количестве итераций более 14. Точность навигации КР при этом достаточно высокая. Погрешность оценок радиальных и трансверсальных составляющих радиуса-вектора и вектора скорости КР при СКО погрешности ЛД $\sigma_p = 1$ м не превышает $\pm 0,2$ м и $\pm 0,02$ мм/с соответственно. При этом, как видно из рисунка 5,а, погрешность оценки боковой координаты КР на 23-й и 28-й итерациях превосходит значение 1 м.

Графики влияния систематических погрешностей измерений на точность решения навигационной задачи САН КР при условии, что СКО погрешностей результатов измерений ОЭС и ЛД равны $\sigma_\theta = 0,1'$ и $\sigma_p = 1$ м, приведены на рис. 8–13.

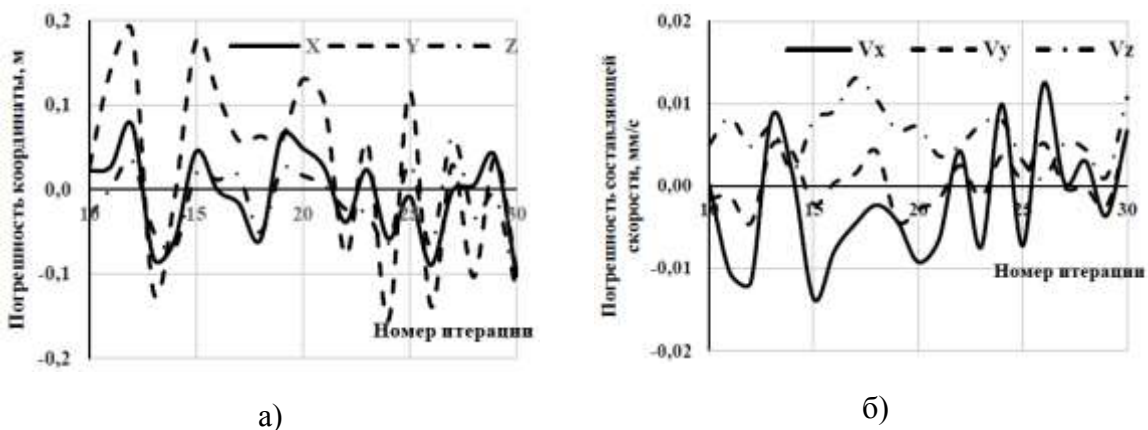


Рис. 8. Графики установившегося итерационного процесса уточнения координат (а) и составляющих вектора скорости (б) КР при $\Delta_\theta = 0,01'$ и $\Delta_p = 0$

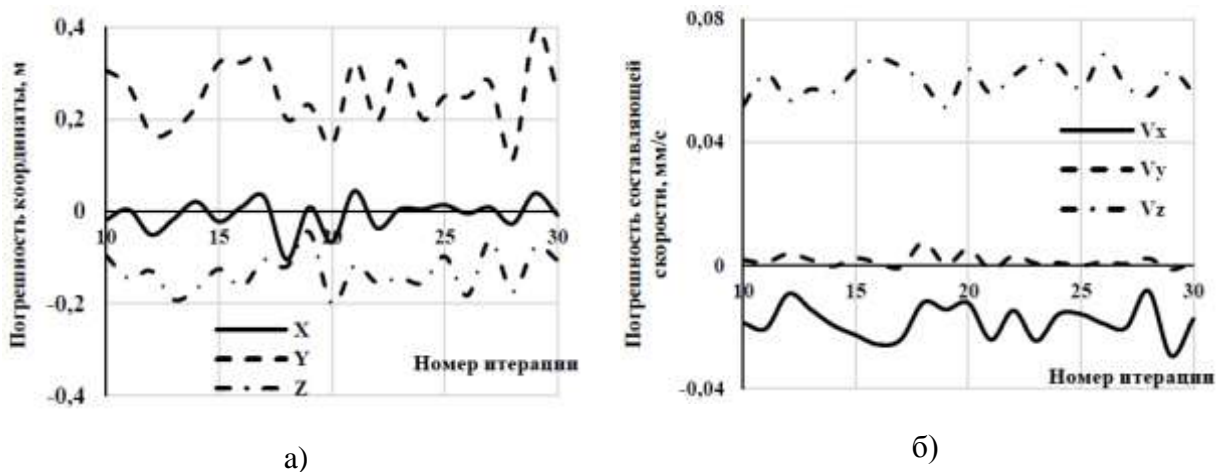
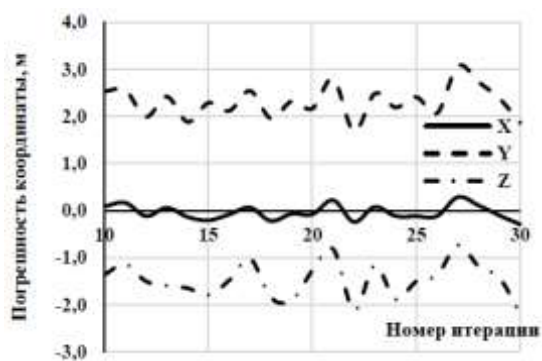
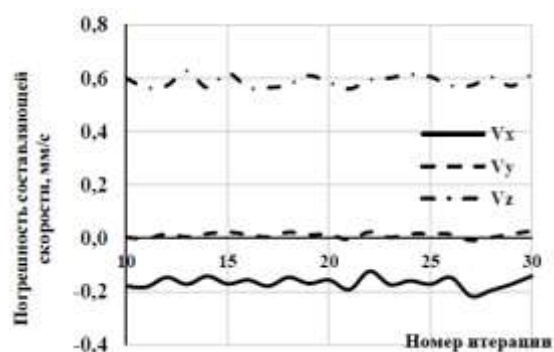


Рис. 9. Графики установившегося итерационного процесса уточнения координат (а) и составляющих вектора скорости (б) КР при $\Delta_\theta = 0,1'$ и $\Delta_p = 0$

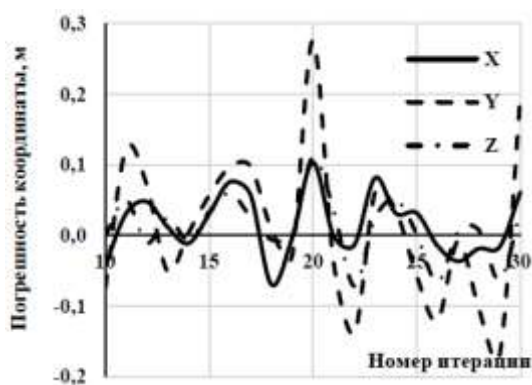


а)

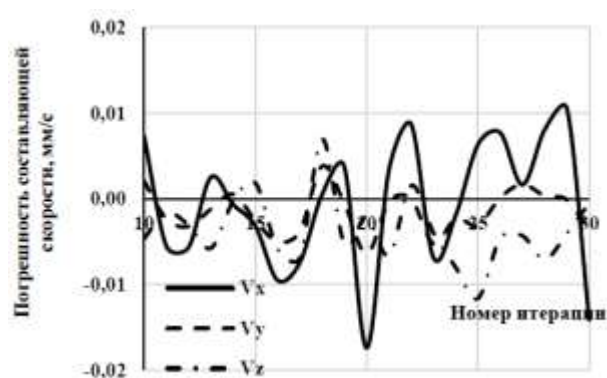


б)

Рис. 10. Графики установившегося итерационного процесса уточнения координат (а) и составляющих вектора скорости (б) КР при $\Delta_\theta = 1'$ и $\Delta_\rho = 0$

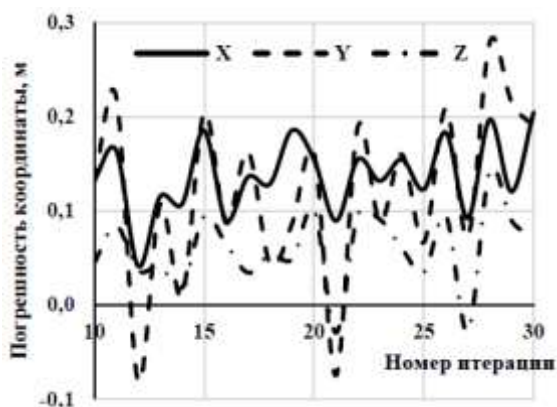


а)

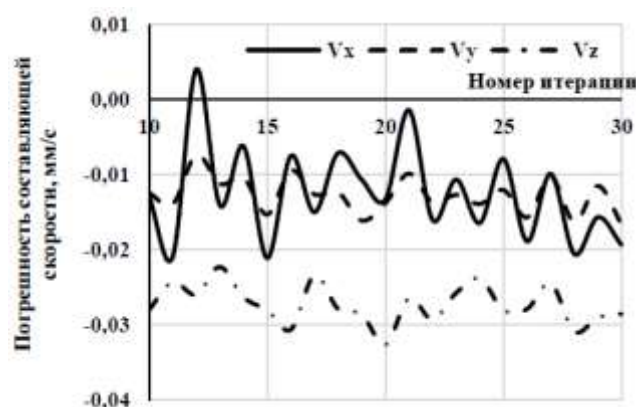


б)

Рис. 11. Графики установившегося итерационного процесса уточнения координат (а) и составляющих вектора скорости (б) КР при $\Delta_\theta = 0$ и $\Delta_\rho = 0,1$ м



а)



б)

Рис. 12. Графики установившегося итерационного процесса уточнения координат (а) и составляющих вектора скорости (б) КР при $\Delta_\theta = 0$ и $\Delta_\rho = 1$ м

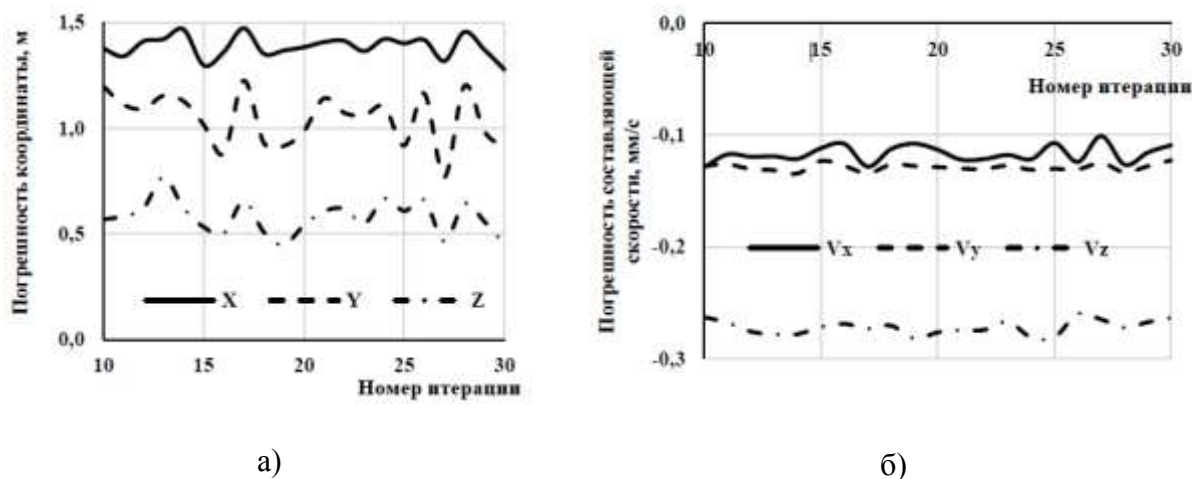


Рис. 13. Графики установившегося итерационного процесса уточнения координат (а) и составляющих вектора скорости (б) КР при $\Delta_\theta = 0$ и $\Delta_\rho = 10$ м

Сравнительная оценка результатов исследований, представленных на рис. 8–13, показывает, что при выбранных диапазонах значений систематических погрешностей ОЭС и ЛД сходимость итерационного навигационного процесса происходит при числе итераций менее 10. Достаточно высокая точность навигации КР сохраняется при систематической погрешности ОЭС $\Delta_\theta = 0,01'$. Погрешности координат и составляющих скорости КР не превышают 0,1–0,2 м и $\pm 0,015$ мм/с соответственно. При этом наибольшее значение погрешности 0,2 м принимает трансверсальная координата КР.

С ростом систематической погрешности ОЭС ($\Delta_\theta > 0,01'$) точность навигации КР снижается. При систематической погрешности ОЭС $\Delta_\theta = 1'$ погрешности координат и составляющих скорости КР достигают 3 м и 0,6 мм/с соответственно.

Систематическая погрешность ЛД в диапазоне 0,1–1,0 м при отсутствии систематической погрешности ОЭС оказывает незначительное влияние на точность навигации КР. При систематической погрешности ЛД, равной 10 м, погрешности уточнения координат и составляющих скорости КР увеличиваются и становятся равными 0,5–1,5 м и 0,1–0,3 мм/с соответственно.

Результаты проведенных исследований показывают, что для автономного решения навигационной задачи КР, предназначенным для проведения сервисного обслуживания КА на геостационарной орбите, с погрешностями не более 0,5 м по координатам и 0,6 мм/с по составляющим скорости, в состав измерительных средств его САН должны входить ОЭС и ЛД, обладающие следующими характеристиками: $\sigma_\theta = 0,1 \div 1,0$ угл. мин, $\Delta_\theta = 0,01 \div 0,1$ угл. мин, $\sigma_\rho = 0,1 \div 1,0$ м, $\Delta_\rho = 0,1 \div 1,0$ м соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье выполнено обоснование состава бортовых средств измерений САН КР, функционирование которого происходит в пределах орбитальной позиции ОКА. С позиций теории наблюдения параметров движения динамических систем показано, что принципиальная возможность нахождения оценок координат и составляющих вектора скорости КР достигается при использовании ОЭС, способной измерять углы между линиями визирования

ОКА и двух навигационных звезд, и ЛД, предназначенного для измерения дальности до ОКА.

Для выполнения САН КР своей целевой функции с заданными характеристиками точности обоснованы требования к показателям точности средств измерений, входящих в САН КР. Результаты исследования получены методом математического моделирования процесса функционирования САН КА, обработка навигационных измерений выполнена с помощью рекуррентного метода наименьших квадратов.

Представленные результаты могут быть использованы при выборе облика САН КР, предназначенного для решения сервисных задач на геостационарной орбите.

Список используемых источников

1. 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.

2. Силантьев С. И., Фоминов В. И., Королев С. Ю. Роботы на орбите // Воздушно-космическая сфера. – 2016. – № 2 (87). – С. 118–123.

3. Белоножко П. П. Космическая робототехника для монтажа и сервиса: потенциальные задачи, концепции перспективных систем // Воздушно-космическая сфера. – 2019. – № 2 (99). – С. 85–95.

4. Далаев И. В., Шардыко И. В., Кузнецова Е. М. Перспектива создания роботизированных сервисных спутников для технического обслуживания и продления сроков активного существования космических аппаратов // Робототехника и техническая кибернетика. – 2015. – № 3. – С. 27–31.

5. Бетанов В. В., Кудряшов М. И. Метод определения вектора состояния геостационарных КА по измерениям с использованием идентифицирующих ограничений // Известия РАН. – 2008. – № 2. – С. 83 – 95.

6. Бетанов В. В., Махненко Ю. Ю. Совершенствование однопунктового способа навигации геостационарного спутника // Вестник МГТУ имени Н. Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. – 2009. – № 3 (76). – С. 3 – 18.

7. Ислентьев Е. В., Гречкосеев А. К. Определение параметров орбит геостационарных космических аппаратов по сигналам навигационных систем ГЛОНАСС и GPS // Известия вузов. Приборостроение. – 2004. – Т. 47, № 4. – С. 5–9.

8. Конин В. В., Шишков Ф. А. Автономная навигация космических сервисных аппаратов на геостационарной орбите по сигналам ГНСС // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2016. – № 12 (654). – С. 43–49.

9. Автономная навигация космических аппаратов / Г. П. Аншаков [и др.]; под общ. ред. А. Н. Кирилина. – Самара : Государственный научно-производственный ракетно-космический центр «ЦСКБ-Прогресс». – 2011. – 486 с.

10. Голяков А. Д., Ананенко В. М., Фоминов В. И. Системы навигации летательных аппаратов. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2018. – 273 с.

11. Пешехонов В. Г. Высокоточная навигация без использования информации глобальных навигационных спутниковых систем // Гироскопия и навигация. – 2022. – Т. 30, № 1 (116). – С. 3–11.

12. Голяков А. Д., Фоминов В. И., Королев С. Ю. Аналитические исследования точности навигации космического робота по совместным бортовым измерениям угловых и линейных параметров движения орбитального объекта // Известия вузов. Приборостроение. – 2017. – Т. 60, № 8. – С. 734–741.

13. Ананенко В. М., Голяков А. Д., Калабин П. В. Аналитическое определение параметров движения центра масс некооперируемого орбитального объекта на основе измерительной

информации бортовых средств космического робота на компланарной орбите // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2019. – Т. 18, № 3. – С. 7–15.

14. *Тучин Д. А.* Автономное определение орбиты на борту космического аппарата // Препринты ИПМ имени М. В. Келдыша РАН. – 2019. – № 7. – 25 с.

15. *Ананенко В. М., Голяков А. Д., Калабин П. В.* Метод предварительного решения задачи навигации космического робота по бортовым астрономическим измерениям с использованием фильтра Баттеворта // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2020. – Т. 19, № 2. – С. 7–18.

16. *Калман Р.* Об общей теории систем управления // Первый Международный конгресс ИФАК по автоматическому управлению : докл. – М. : Изд-во АН СССР, 1961. – Т. 2. – С. 284–313.

17. *Костюковский Ю. М.-Л.* О наблюдаемости нелинейных управляемых систем // Автоматика и телемеханика. – 1968. – Вып. 9. – С. 29–42.

18. *Брандин В. Н., Разоренов Г. Н.* Об условиях наблюдаемости нелинейных динамических систем // Автоматика и телемеханика. – 1973. – Вып. 9. – С. 5–11.

19. *Разоренов Г. Н.* Наблюдаемость в нелинейных задачах навигации космических аппаратов // Космические исследования. – 1975. – Т. XIII, вып. 2. – С. 190–200.

20. *Брандин В. Н., Разоренов Г. Н.* Определение траекторий космических аппаратов. – М. : Машиностроение, 1978. – 216 с.

21. *Красовский А. А.* Условие наблюдаемости нелинейных процессов // Доклады АН СССР. – 1978. – Т. 242, № 6. – С. 1265–1268.

В. И. Горбулин*,
доктор технических наук, профессор;
А. А. Матвеев*,
кандидат военных наук;
С. А. Поляков**;
И. А. Фадин*,
кандидат технических наук

* Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург.

** Департамент Правительства Российской Федерации, г. Москва.

АЛГОРИТМ СИНТЕЗА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ВОКРУГ ЦЕНТРА МАСС ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА КРУГОВЫХ ОРБИТАХ РАВНОГО РАДИУСА

Разработан алгоритм и получены аналитические соотношения для синтеза управления движением взаимодействующих космических аппаратов вокруг центра масс. Предложенный алгоритм базируется на том факте, что линия, соединяющая два космических объекта, движущихся по круговым орбитам равного радиуса, перемещается параллельно плоскости псевдоэкватора, покоящейся в инерциальном пространстве. Задача синтеза управления разбита на две подзадачи: переориентации оси КА с предыдущего аппарата на следующий и сопровождения аппарата. Предложенное решение позволяет синтезировать оптимальное по критерию минимума затрат энергии управление.

Ключевые слова: движение вокруг центра масс, сферическое движение, управление, космический аппарат.

ВВЕДЕНИЕ

Задачи переориентации регулярно возникают в практике управления космическими аппаратами (КА), приобретая особую значимость при организации взаимодействия между КА. Результаты анализа существующих подходов к построению космических систем контроля техногенной космической обстановки свидетельствуют о том, что космические аппараты данных систем предлагается выводить на орбиты равного радиуса и наклона [1, 2]. Это позволит сохранить баллистическую структуру системы за счет одинаковой скорости прецессии орбитальных плоскостей [3].

Линия, соединяющая космические аппараты, движущиеся по круговым орбитам равного радиуса, всегда параллельна некоторой плоскости – плоскости псевдоэкватора [2, 4]. Использование данного свойства позволяет упростить задачу синтеза управления движением взаимодействующих КА и составляет новизну разработанного алгоритма.

Разработанный алгоритм позволяет синтезировать квазиоптимальное по энергии управление движением КА вокруг центра масс при его взаимодействии с другим КА, движущимся по орбите равного радиуса.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Дано:

- а) параметры движения КА по орбите в начальный момент времени t_0 :
 - Ω_1, Ω_2 – прямое восхождение восходящего узла орбит КА;
 - u_{01}, u_{02} – аргументы широты космических аппаратов;
 - r – радиус орбит КА;

- i – наклонение орбит КА;
 - б) ориентация осей связанной системы координат КА в момент времени t_0 – Λ_0 ;
 - в) параметры сферического движения КА в момент времени t_0 :
 - ω_0 – угловая скорость;
 - ε_0 – угловое ускорение;
 - г) главные моменты инерции КА – I_1, I_2, I_3 ;
 - д) временные параметры взаимодействия:
 - t_b – время начала взаимодействия;
 - t_e – время окончания взаимодействия;
 - е) максимально допустимые управляющие моменты: $M_1^{\max}, M_2^{\max}, M_3^{\max}$.
- Найти: $\mathbf{M}(t)$ – управление движением вокруг центра масс.

СОДЕРЖАТЕЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА

Задача синтеза управления разбита на две подзадачи: синтез управления $\mathbf{M}_i(t)$, $t \in [t_0, t_b)$ при перенацеливании КА из исходной ориентации в ориентацию Λ_b , соответствующую началу взаимодействия КА и синтез управления $\mathbf{M}_i(t)$, $t \in [t_b, t_e]$ при взаимодействии КА.

Структурно-логическая схема разработанного алгоритма представлена на рис. 1.

На **первом этапе** с помощью модели относительного движения КА [3] определяются параметры ориентации плоскости псевдоэкватора (рис. 2):

$$\sin i_{pe} = \sin \frac{u_{02} - u_{01}}{2} \frac{\sin i}{\sqrt{1 - \left(\cos \frac{\Omega_2 - \Omega_1}{2} \cos \frac{u_{02} - u_{01}}{2} - \sin \frac{\Omega_2 - \Omega_1}{2} \sin \frac{u_{02} - u_{01}}{2} \cos i \right)^2}},$$

$$\operatorname{ctg} i_{pe} = \frac{\sin \frac{\Omega_2 - \Omega_1}{2} \operatorname{ctg} \frac{u_{02} - u_{01}}{2} + \cos \frac{\Omega_2 - \Omega_1}{2} \cos i}{\sin i},$$

$$\Omega_{pe} = \frac{\Omega_1 + \Omega_2}{2},$$

где i_{pe} – наклонение плоскости псевдоэкватора;

Ω_{pe} – прямое восхождение восходящего узла плоскости псевдоэкватора.

На **втором этапе** определяются наклонения плоскостей орбит i^* и аргументы широты взаимодействующих космических аппаратов u^* в псевдоэкваториальной системе координат (ось OX_{pe} направлена из центра Земли в точку Ω_{pe} на экваторе, ось OZ_{pe} – перпендикулярно плоскости псевдоэкватора таким образом, что пересекает северное полушарие при $i_{pe} < \frac{\pi}{2}$, и южное полушарие при $i_{pe} > \frac{\pi}{2}$, ось OY_{pe} дополняет систему координат до правой тройки):

$$\sin i^* = \sin i \frac{\sin \frac{\Omega_2 - \Omega_1}{2}}{\sqrt{1 - \left(\cos \frac{\Omega_2 - \Omega_1}{2} \cos \frac{u_{02} - u_{01}}{2} - \sin \frac{\Omega_2 - \Omega_1}{2} \sin \frac{u_{02} - u_{01}}{2} \cos i \right)^2}},$$

$$u^* = \omega_{SC} (t - t_0) + \frac{u_{01} + u_{02}}{2}.$$

Здесь ω_{SC} – угловая скорость движения КА по орбите, $\omega_{SC} = r^{-\frac{3}{2}} \sqrt{\mu}$, где μ – гравитационная постоянная Земли, $\mu = 398600.44 \text{ км}^3/\text{с}^2$.

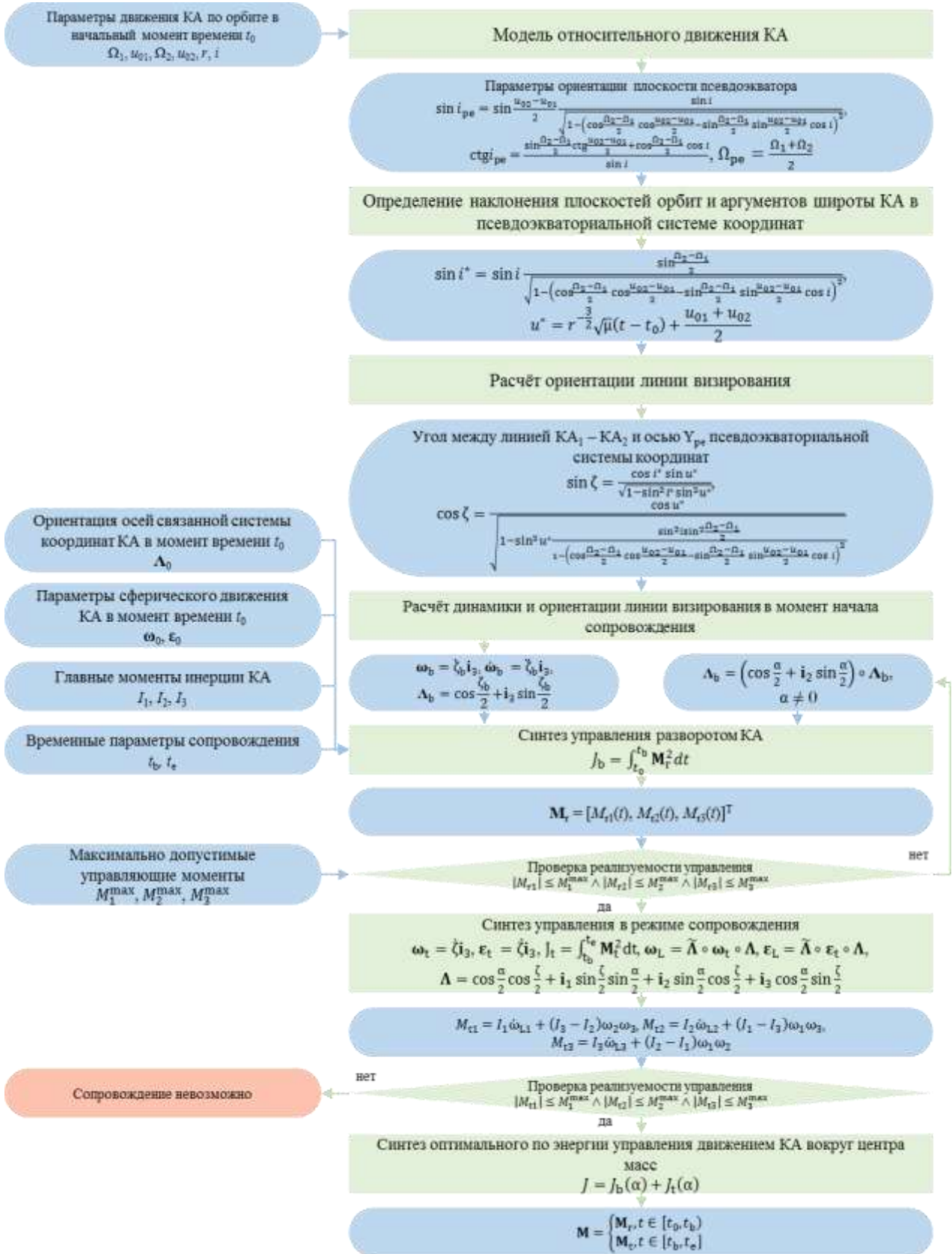


Рис. 1. Структурно-логическая схема алгоритма синтеза управления движением вокруг центра масс при информационном взаимодействии космических аппаратов на круговых орбитах равного радиуса

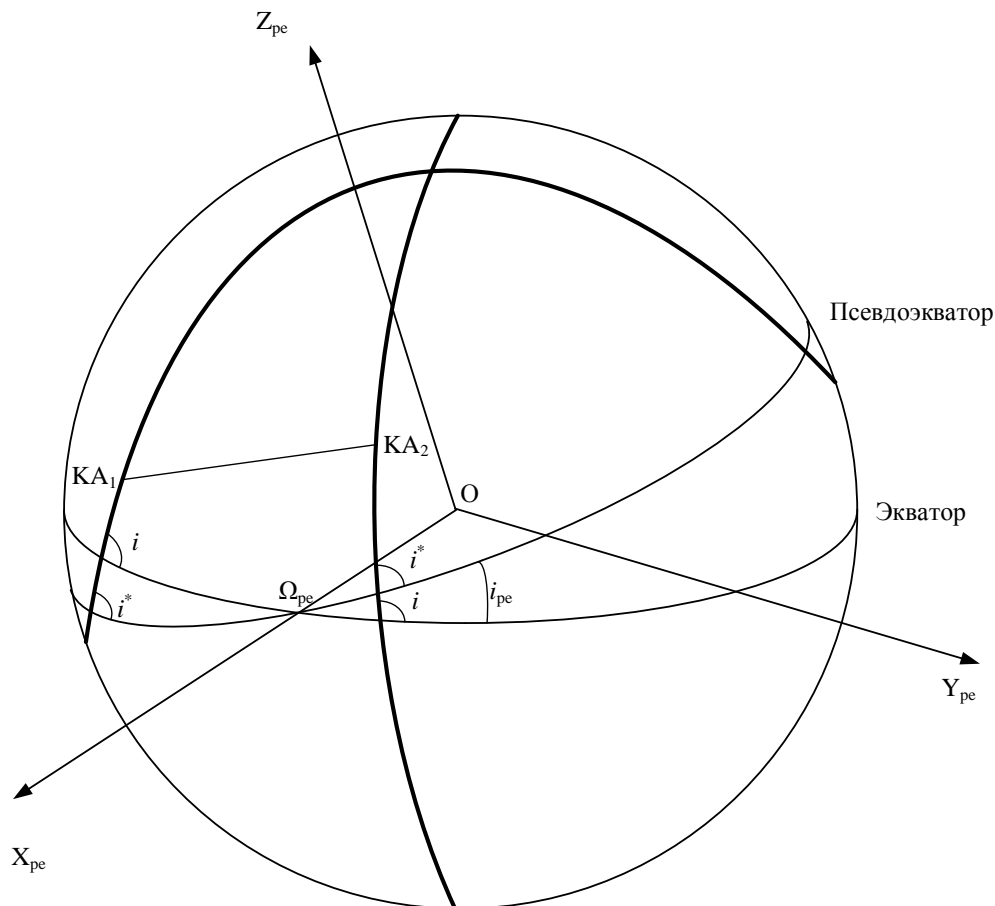


Рис. 2. Ориентация плоскости псевдоэкватора

На **третьем этапе** производится расчет ориентации линии визирования $KA_1 - KA_2$:

$$\sin \zeta = \frac{\cos i^* \sin u^*}{\sqrt{1 - \sin^2 i^* \sin^2 u^*}},$$

$$\cos \zeta = \frac{\cos u^*}{\sqrt{1 - \sin^2 u^* \frac{\sin^2 i \sin^2 \frac{\Omega_2 - \Omega_1}{2}}{1 - \left(\cos \frac{\Omega_2 - \Omega_1}{2} \cos \frac{u_{02} - u_{01}}{2} - \sin \frac{\Omega_2 - \Omega_1}{2} \sin \frac{u_{02} - u_{01}}{2} \cos i \right)^2}}},$$

где ζ – угол между линией $KA_1 - KA_2$ и осью $Y_{ре}$.

На **четвертом этапе** производится расчет динамики (угловой скорости ω_b , углового ускорения ε_b) и ориентации линии визирования Λ_b в момент начала сопровождения t_b :

$$\omega_b = \dot{\zeta}_b \mathbf{i}_3,$$

$$\dot{\omega}_b = \varepsilon_b = \ddot{\zeta}_b \mathbf{i}_3,$$

где \mathbf{i}_3 – орт оси $Z_{ре}$.

Далее для определенности полагается, что целевая аппаратура направлена вдоль оси 2 связанной системы координат. Без потери общности можно задать любое другое значение ориентации целевой аппаратуры относительно связанной системы координат КА, введя дополнительный кватернион поворота. Для того чтобы минимизировать затраты энергии на управление КА в режиме сопровождения, целесообразно совместить с осью $Z_{ре}$ ту ось свя-

занной системы координат КА (из оставшихся двух), относительно которой момент инерции КА меньше. На рис. 3 изображен тот случай, когда таким свойством обладает ось 3, т. е.

$$I_3 = \min(I_1, I_2),$$

тогда

$$\Lambda_b = \cos \frac{\zeta_b}{2} + \mathbf{i}_3 \sin \frac{\zeta_b}{2}.$$

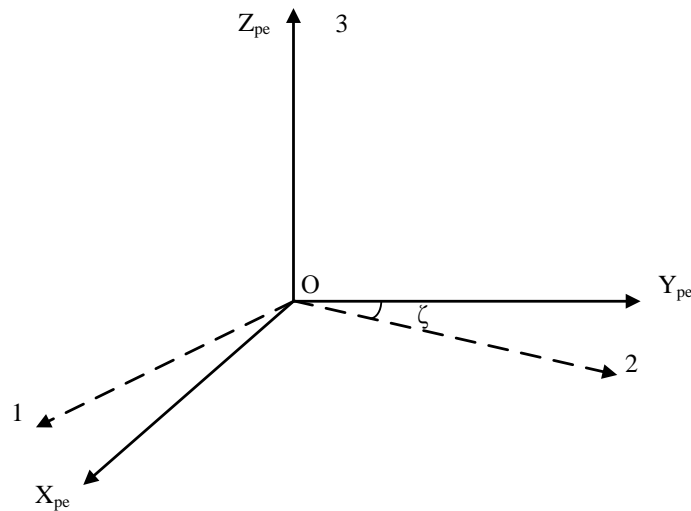


Рис. 3. Взаимная ориентация осей связанной и псевдоэкваториальной систем координат при совмещении осей $Z_{ре}$ и 3 связанной систем координат

На **пятом этапе** производится синтез управления разворотом КА. Сферическое движение КА представляется как результат сложения трех вращений [5]:

$$\Lambda(\tau) = \Lambda_0 \circ \Lambda_1(\tau) \circ \Lambda_2(\tau) \circ \Lambda_3(\tau),$$

$$\Lambda_k(\tau) = \cos \frac{\varphi_k(\tau)}{2} + \mathbf{e}_k \sin \frac{\varphi_k(\tau)}{2},$$

где \mathbf{e}_k – орт оси k -го поворота, $k = 1, 2, 3$.

Далее движение рассматривается в инерциальной системе отсчета, определяемой начальной ориентацией главных осей инерции КА Λ_0 . В ней

$$\Lambda_1(\tau_0) = \Lambda_2(\tau_0) = \Lambda_3(\tau_0) = \mathbf{1}.$$

Орт \mathbf{e}_3 определяется из соотношения

$$\Lambda^* = \cos \frac{\varphi^*}{2} + \mathbf{e}_3 \sin \frac{\varphi^*}{2} = \tilde{\Lambda}_0 \circ \Lambda_b,$$

тогда

$$\Lambda_1(\tau_b) = \Lambda_2(\tau_b) = \mathbf{1}, \quad (1)$$

$$\Lambda_3(\tau_b) = \cos \frac{\varphi^*}{2} + \mathbf{e}_3 \sin \frac{\varphi^*}{2}.$$

Орт оси Эйлера первого поворота \mathbf{e}_1 определяется по следующему алгоритму:

$$\mathbf{e}_0^\omega \equiv \frac{\boldsymbol{\omega}_0}{\omega_0}, \quad \mathbf{e}_b^\omega \equiv \frac{\boldsymbol{\omega}_b}{\omega_b}, \quad \mathbf{e}_0^\varepsilon \equiv \frac{\boldsymbol{\varepsilon}_0}{\varepsilon_0}, \quad \mathbf{e}_b^\varepsilon \equiv \frac{\boldsymbol{\varepsilon}_b}{\varepsilon_b}, \quad \mathbf{a} \equiv \mathbf{e}_0^\omega - (\mathbf{e}_0^\omega \cdot \mathbf{e}_3) \cdot \mathbf{e}_3, \quad a \equiv |\mathbf{a}|.$$

Шаг 1. Если $a > 0$, то $\mathbf{e}_1 = \frac{\mathbf{a}}{a}$, конец алгоритма. В противном случае осуществляется следующий шаг.

Шаг 2. $\mathbf{a} = \mathbf{e}_b^\omega - (\mathbf{e}_b^\omega \cdot \mathbf{e}_3) \cdot \mathbf{e}_3$. Если $|\mathbf{a}| > 0$, то $\mathbf{e}_1 = \frac{\mathbf{a}}{a}$, конец алгоритма. В противном случае осуществляется следующий шаг.

Шаг 3. $\mathbf{a} = \mathbf{e}_0^\varepsilon - (\mathbf{e}_0^\varepsilon \cdot \mathbf{e}_3) \cdot \mathbf{e}_3$. Если $|\mathbf{a}| > 0$, то $\mathbf{e}_1 = \frac{\mathbf{a}}{a}$, конец алгоритма. В противном случае осуществляется следующий шаг.

Шаг 4. $\mathbf{a} = \mathbf{e}_b^\varepsilon - (\mathbf{e}_b^\varepsilon \cdot \mathbf{e}_3) \cdot \mathbf{e}_3$. Если $|\mathbf{a}| > 0$, то $\mathbf{e}_1 = \frac{\mathbf{a}}{a}$, иначе поворот вокруг оси Эйлера \mathbf{e}_3 – единственный, т. е. $\Lambda_1(\tau) \equiv \mathbf{1}$, $\Lambda_2(\tau) \equiv \mathbf{1}$.

Орт оси Эйлера второго поворота

$$\mathbf{e}_2 = \mathbf{e}_3 \times \mathbf{e}_1.$$

Законы движения связанной системы координат аппроксимируются многочленами пятой степени [5]:

$$\begin{aligned} \ddot{\varphi}_k(\tau) &= \varepsilon_k(\tau) = \ddot{\varphi}_k(0) + \frac{\tau(6a_3^k + 12a_4^k\tau + 20a_5^k\tau^2)}{(t_b - t_0)^2}, \\ \dot{\varphi}_k(\tau) &= \omega_k(\tau) = \dot{\varphi}_k(0) + \ddot{\varphi}_k(0)(t_b - t_0)\tau + \frac{\tau^2(3a_3^k + 4a_4^k\tau + 5a_5^k\tau^2)}{t_b - t_0}, \\ \varphi_k(\tau) &= \varphi_k(0) + \tau \left(\dot{\varphi}_k(0)(t_b - t_0) + \frac{\ddot{\varphi}_k(0)(t_b - t_0)^2\tau}{2} + \tau^2(a_3^k + a_4^k\tau + a_5^k\tau^2) \right), \\ \begin{pmatrix} a_3^k \\ a_4^k \\ a_5^k \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 10 & -4 & \frac{1}{2} \\ -15 & 7 & -1 \\ 6 & 3 & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varphi_k(t_b) - \varphi_k(t_0) - \dot{\varphi}_k(t_0)(t_b - t_0) - \frac{\ddot{\varphi}_k(t_0)(t_b - t_0)^2}{2} \\ (t_b - t_0)(\dot{\varphi}_k(t_b) - \dot{\varphi}_k(t_0) - \ddot{\varphi}_k(t_b)(t_b - t_0)) \\ (t_b - t_0)^2(\ddot{\varphi}_k(t_b) - \ddot{\varphi}_k(t_0)) \end{pmatrix}, \\ \tau &= \frac{t}{t_b - t_0}, \end{aligned}$$

где φ_1 – угол прецессии;

φ_2 – угол нутации;

φ_3 – угол собственного вращения.

Взаимосвязь углов φ_k с компонентами кватерниона ориентации КА $\Lambda = (\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)^T$ выражается соотношениями:

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \arctg \frac{\lambda_2}{\lambda_1} + \arctg \frac{\lambda_3}{\lambda_0}, \\ \varphi_3 &= \arctg \frac{\lambda_3}{\lambda_0} - \arctg \frac{\lambda_2}{\lambda_1}, \\ \varphi_2 &= 2 \arctg \left(\frac{\lambda_1 \cos \frac{\varphi_1 + \varphi_3}{2}}{\lambda_0 \cos \frac{\varphi_1 - \varphi_3}{2}} \right). \end{aligned}$$

Управляющие моменты определяются из соотношений:

$$\begin{cases} M_1 = I_1 \varepsilon_{L1} + (I_3 - I_2) \omega_{L2} \omega_{L3}, \\ M_2 = I_2 \varepsilon_{L2} + (I_1 - I_3) \omega_{L1} \omega_{L3}, \\ M_3 = I_3 \varepsilon_{L3} + (I_2 - I_1) \omega_{L1} \omega_{L2}, \end{cases}$$

$$\omega_L = \tilde{\Lambda} \circ \omega \circ \Lambda,$$

$$\varepsilon_L = \tilde{\Lambda} \circ \varepsilon \circ \Lambda.$$

Так как условию (1) соответствуют углы $\varphi_{b1} = 2\pi n_1$, $\varphi_{b2} = 2\pi n_2$, $\varphi_{b3} = \varphi_{b3} + 2\pi n_3$, $n_1 \in \mathbb{Z}$, $n_2 \in \mathbb{Z}$, $n_3 \in \mathbb{Z}$, то значения данных углов выбираются исходя из условия доставления минимума функционалу:

$$J_b(\varphi_b) = \int_{t_0}^{t_b} \mathbf{M}_r^2(\varphi_b, t) dt.$$

На **шестом этапе** осуществляется проверка реализуемости управления во время разворота:

$$\begin{cases} M_1 \leq M_1^{\max}, \\ M_2 \leq M_2^{\max}, \\ M_3 \leq M_3^{\max}. \end{cases}$$

Если оптимальное управление нереализуемо, то сначала проверяется возможность синтеза неоптимального по функционалу $J_b(\varphi_b)$ управления. Если синтезировать реализуемое управление не удастся, то ориентация КА в момент начала сопровождения задается в виде

$$\Lambda_b = \left(\cos \frac{\alpha}{2} + \mathbf{i}_2 \sin \frac{\alpha}{2} \right) \circ \left(\cos \frac{\zeta_b}{2} + \mathbf{i}_3 \sin \frac{\zeta_b}{2} \right) = \begin{pmatrix} \cos \frac{\alpha}{2} \cos \frac{\zeta_b}{2} \\ \sin \frac{\alpha}{2} \sin \frac{\zeta_b}{2} \\ \sin \frac{\alpha}{2} \cos \frac{\zeta_b}{2} \\ \cos \frac{\alpha}{2} \sin \frac{\zeta_b}{2} \end{pmatrix},$$

где угол α (рис. 4) определяется на основе граничных условий, реализуемости управления и доставления минимума функционалу:

$$J(\varphi_b, \alpha) = J_b(\varphi_b, \alpha) + J_t(\varphi_b, \alpha),$$

$$J_b(\varphi_b, \alpha) = \int_{t_0}^{t_b} \mathbf{M}_r^2(\varphi_b, \alpha, t) dt,$$

$$J_t(\varphi_b, \alpha) = \int_{t_b}^{t_e} \mathbf{M}_t^2(\varphi_b, \alpha, t) dt.$$

Затем заново повторяются этапы 5 и 6.

На **седьмом этапе** осуществляется синтез управления в режиме сопровождения. В псевдо-экваториальной системе координат:

$$\omega_t = \dot{\zeta} \mathbf{i}_3,$$

$$\varepsilon_t = \ddot{\zeta} \mathbf{i}_3.$$

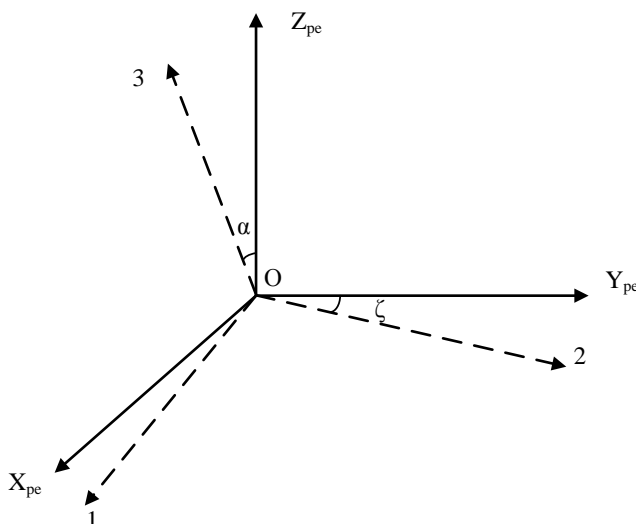


Рис. 4. Общий случай ориентации осей связанной системы координат КА относительно псевдоэкваториальной системы координат

В связанной системе координат

$$\begin{aligned}\omega_L &= \tilde{\Lambda} \circ \omega_t \circ \Lambda, \\ \varepsilon_L &= \tilde{\Lambda} \circ \varepsilon_t \circ \Lambda.\end{aligned}$$

Если $\alpha = 0$, то $\omega_L = \omega_t$, $\varepsilon_L = \varepsilon_t$, тогда управление

$$\begin{cases} M_1 = 0, \\ M_2 = 0, \\ M_3 = I_3 \varepsilon_{L3}. \end{cases}$$

Таким образом, замысел совмещения одной из осей связанной системы координат с осью $Z_{ре}$ состоит в том, чтобы в режиме сопровождения управлять КА, задавая момент только вдоль одной из осей связанной системы координат.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗРАБОТАННОГО МЕТОДА

Проверка работоспособности представленного алгоритма проводилась на примере решения задачи синтеза управления движением вокруг центра масс КА системы контроля техногенной космической обстановки. Для КА данной системы необходимо управлять сферическим движением как для наблюдения космических объектов, так и для организации взаимодействия между КА, движущимися в разных орбитальных плоскостях [1, 2].

Задача решалась при следующем наборе исходных данных: $\Omega_1 = 0$ рад, $\Omega_2 = 0.35$ рад, $u_{01} = 0$ рад, $u_{02} = 0.15$ рад, $r = 7000$ км, $i = 1.05$ рад, $\Lambda_0 = -0.225 + 0.455\mathbf{i}_1 - 0.708\mathbf{i}_2 + 0.49\mathbf{i}_3$, $\omega_0 = (0.0738, -0.02, -0.03)^T$ [рад/с], $\varepsilon_0 = (0, 0, 0)^T$, $I_1 = 2 \cdot 10^5$ кг·м², $I_2 = 1.1 \cdot 10^5$ кг·м², $I_3 = 1.5 \cdot 10^5$ кг·м², $t_0 = 0$ с, $t_b = 100$ с, $t_e = 2000$ с.

На рис. 5 представлен график зависимости углов поворота φ_1 , φ_2 , φ_3 от модифицированного времени τ и конечных углов ориентации КА φ_b на этапе переориентации КА. Минимуму функционала $J_b(\varphi_b)$ соответствует $\varphi_{b2} = -2\pi$, $\varphi_{b3} = 2\pi$.

На рис. 6 представлен график зависимости проекций управляющих моментов на оси связанной системы координат от модифицированного времени τ и конечных углов ориентации КА φ_b на этапе переориентации КА.

На рис. 7 представлен график зависимости управляющего момента $M_3(t)$ для канонического случая совмещения осей $Z_{ре}$ и 3 связанной системы координат.

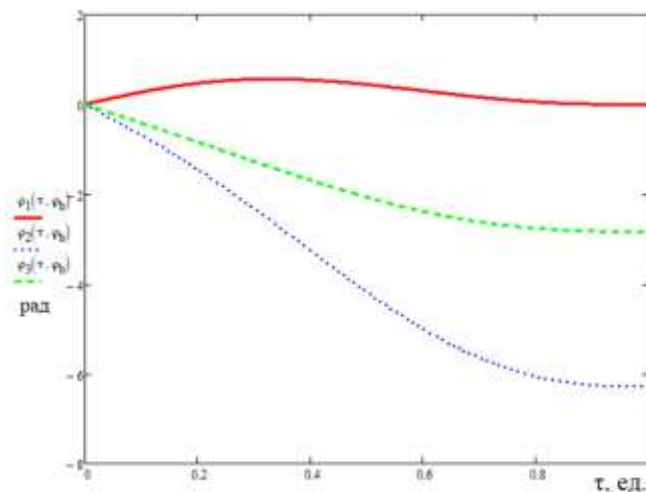


Рис. 5. График зависимости углов поворота $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ от модифицированного времени τ и конечных углов ориентации КА φ_b на этапе переориентации КА

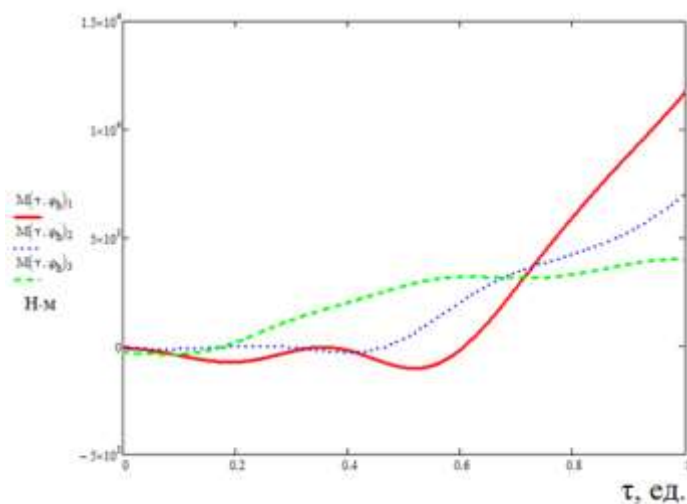


Рис. 6. График зависимости проекций управляющих моментов на оси связанной системы координат от модифицированного времени τ и конечных углов ориентации КА φ_b на этапе переориентации КА

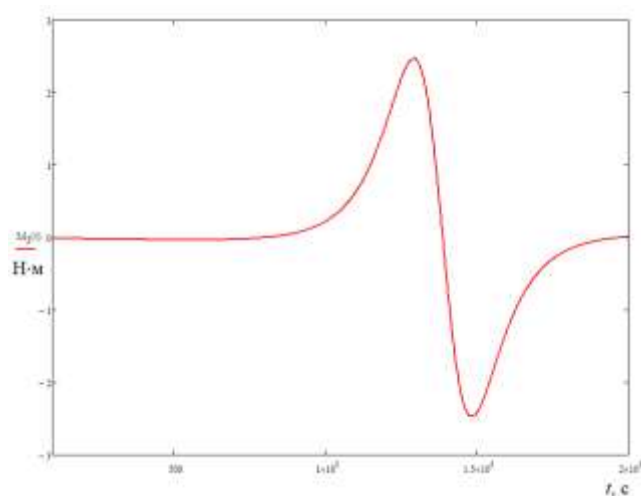


Рис. 7. График зависимости управляющего момента $M_3(t)$ для канонического случая совмещения осей Z_{pe} и Z связанной системы координат

Для демонстрации целесообразности совмещения оси связанной системы координат, момент инерции относительно которой меньше, с осью Z_{pe} в режиме сопровождения на рис. 8 и 9 соответственно представлены графики зависимости максимальной величины управляющего момента $M_{max}(\alpha)$ и функционала $J_t(\alpha)$ для $\alpha \in [0, \frac{\pi}{2}]$.

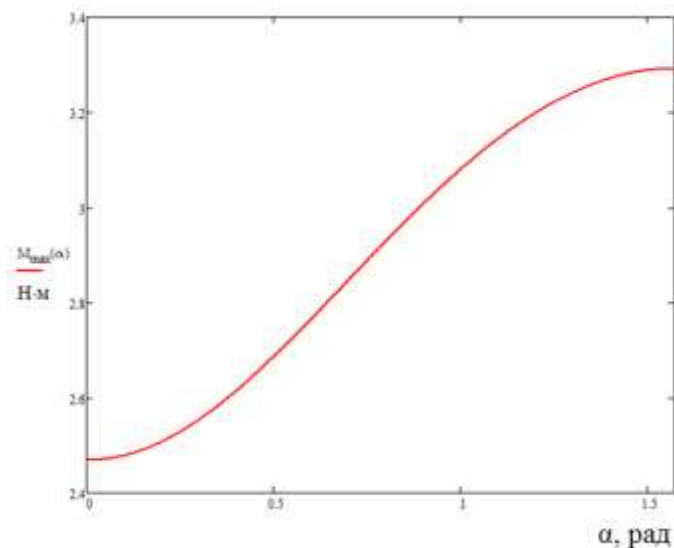


Рис. 8. График зависимости максимальной величины управляющего момента $M_{max}(\alpha)$

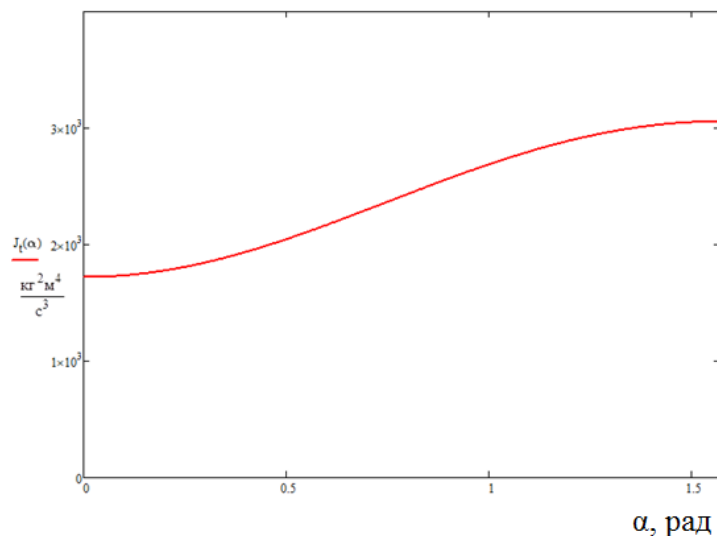


Рис. 9. График зависимости функционала $J_t(\alpha)$

Результаты анализа представленных зависимостей показывают, что выбранный подход к ориентации КА позволяет как минимизировать максимальную величину управляющего момента, так и затраты энергии на управление КА в режиме сопровождения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлен алгоритм синтеза оптимального по энергозатратам управления движением вокруг центра масс при информационном взаимодействии космических аппаратов на круговых орбитах равного радиуса. Новизна полученного результата определяется использованием того свойства, что линия, соединяющая данные космические аппараты, всегда парал-

лельна плоскости псевдоэкватора. Учет данной особенности позволяет выбрать ориентацию КА, позволяющую синтезировать оптимальное управление в режиме сопровождения.

Полученный результат рекомендуется использовать при проведении научно-исследовательских работ по обоснованию баллистической структуры и синтезу управления движением вокруг центра масс КА системы контроля техногенной космической обстановки, а также для обоснования требований к исполнительным органам системы ориентации и стабилизации указанных космических аппаратов.

Список используемых источников

1. *Половников В. И., Скутницкий В. М.* Теоретические основы проектирования орбитальных систем космической триангуляции. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2012. – 175 с.
2. *Фадин И. А., Горбулин В. И., Матвеев А. А.* Модель орбитальной системы мониторинга космической обстановки, построенной на круговых орбитах равного радиуса // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – Вып. 7. – С. 290–304.
3. *Власов С. А.* Теория полета космических аппаратов. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2007. – 435 с.
4. *Денискина А. Р., Прокофьева А. А., Мунтян А. А.* Методика расчета параметров орбиты сближения // Инновации и инвестиции. – 2019. – № 9. – С. 154–158.
5. *Сомов Е. И.* Оптимизация поворотного маневра и синтез законов гиросилового наведения космических аппаратов и свободнолетающих роботов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2007. – Т. 3, № 2. – С. 824–834.

С. И. Моряков,
кандидат технических наук
ЦНИИ ВКС Минобороны России, г. Тверь

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДИ РАССЕЯНИЯ ОБЪЕКТОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ ЛОКАЦИИ НА КОМПАКТНЫХ ПОЛИГОНАХ

Представлен новый метод определения эффективной площади рассеяния объектов на основе учета геометрических искажений измерительного поля при проведении широкополосных измерений в ближней зоне локации. Учет искажений выполняется за счет коррекции двумерных радиоизображений исследуемых объектов. Определение радиолокационных характеристик исследуемого объекта выполняется по его модели на основе набора независимых точечных отражателей. Приведены результаты математического моделирования и эксперимента, подтверждающие возможность получения предложенным методом диаграмм эффективной площади рассеяния, эквивалентных получаемым в дальней зоне локации.

Ключевые слова: эффективная площадь рассеяния, инверсное синтезирование апертуры, радиолокационные изображения, широкополосные измерения.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование радиолокационных характеристик (РЛХ) объектов является актуальной задачей при разработке новой и совершенствовании перспективной радиолокационной техники, а также при отработке мероприятий по снижению заметности летательных аппаратов. Наиболее достоверные данные по эффективной площади рассеяния (ЭПР) объектов получают экспериментальными методами на радиолокационных измерительных комплексах (РИК) открытого типа и в безэховых камерах [1].

В связи с активным развитием широкополосной радиолокационной техники все большую актуальность получают направления исследований, связанные с получением данных по ЭПР объектов в широкой полосе частот (от 1 ГГц и более). Для этого РИК открытого типа могут быть оснащены специальными широкополосными измерительными установками, а безэховые камеры дорогостоящими коллиматорными отражателями для формирования плоского фронта волны во всем используемом частотном диапазоне [2, 3].

Развитие измерительной техники и, в частности, векторных анализаторов цепей, привело к появлению компактных измерительных установок, способных проводить измерения РЛХ объектов в сантиметровом диапазоне и короткой части дециметрового диапазона длин волн в условиях слабой безэховости. Измерения отраженного сигнала при этом проводятся при помощи рупорных широкополосных антенн на небольшом расстоянии от исследуемого объекта. В таких условиях критерий дальней зоны выполняется для объектов, поперечный размер которых не превышает нескольких десятков сантиметров [1].

Целью данной работы было получение ЭПР объектов в широкой полосе частот на компактных полигонах.

Выполнение измерений отраженного сигнала вращающегося объекта в широкой полосе частот дает возможность формирования инверсно синтезированных радиолокационных изображений (РЛИ) исследуемых объектов. Сравнимое с оптическим разрешение таких РЛИ позволяет представить исследуемый объект в виде совокупности его элементов – локальных центров рассеяния (ЛЦР). Так как известные алгоритмы синтеза РЛИ предполагают проведение измерений отраженных от объекта сигналов в дальней зоне локации, то их применение

для синтеза РЛИ по результатам измерений в ближней зоне приводит к геометрическим и энергетическим искажениям ЛЦР исследуемого объекта.

Задача данной работы заключалась в разработке метода определения ЭПР объектов с допустимой погрешностью за счет коррекции их РЛИ, синтезированных по результатам измерений в ближней зоне.

КОРРЕКЦИЯ РАДИОИЗОБРАЖЕНИЙ ИССЛЕДУЕМЫХ ОБЪЕКТОВ

Известен и успешно применяется на практике способ формирования двумерных РЛИ на основе обратного преобразования Фурье отраженного сигнала, зарегистрированного в полярных координатах «частота-угол» и интерполированного в прямоугольные координаты «пространственных частот», билинейно связанных с декартовыми. Способ обеспечивает разрешение формируемых двумерных РЛИ в зависимости от сектора углов синтезирования – до 0,2 значения средней длины волны по обеим декартовым координатам при синтезировании сигнала в секторе 360° [4].

При выполнении условий дальней зоны оператор синтезирования двумерного РЛИ объекта под ракурсом ψ_0 , в декартовых координатах дальности и поперечной координаты плоскости локации имеет вид [4]

$$s(x, z) = \frac{1}{2\Delta\psi(f_{\max} - f_{\min})} \int_{\psi_0 - \Delta\psi}^{\psi_0 + \Delta\psi} \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} S(\psi, f) e^{j4\pi\frac{f}{c}(z\cos\psi + x\sin\psi)} d\psi df, \quad (1)$$

где $s(x, z)$ – комплексная амплитуда отраженного объектом сигнала в точке с координатами z по дальности и x поперек;

$S(\psi, f)$ – комплексная амплитуда отраженного объектом сигнала в координатах угла поворота ψ , изменяющегося от $\psi_0 - \Delta\psi$ до $\psi_0 + \Delta\psi$, и частоты зондирования f в полосе перестройки от f_{\min} до f_{\max} .

При проведении измерений отраженного объектом сигнала в ближней зоне расстояние от фазового центра антенны до точки объекта с координатами z и x в связанной с объектом системе координат при повороте объекта на угол ψ (рис. 1) меняется в соответствии с выражением

$$r = \sqrt{R_0^2 + 2R_0p \sin \psi + p^2}, \quad \text{где } p = \sqrt{x_0^2 + z_0^2} \quad (2)$$

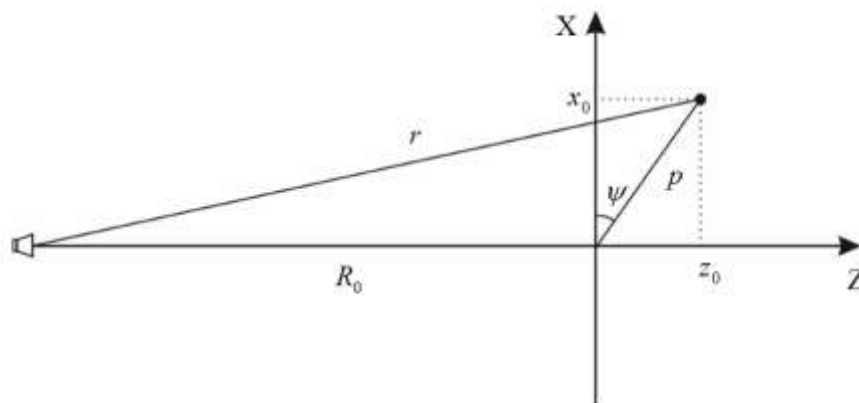


Рис. 1. Схема геометрических соотношений при проведении измерений на компактном полигоне

Учитывая, что $AC = 2r$, $BC = \sqrt{x^2 + h^2}$, $DC = h$, определим искомую величину:

$$h = \frac{x^2}{r + r\sqrt{1 - \frac{x^2}{r^2}}} \approx \frac{x^2}{2r}. \quad (8)$$

Итоговое выражение для корректировки координаты дальности примет следующий вид:

$$z = \sqrt{r^2 - x^2} - R_0 - \frac{x^2}{2r}. \quad (9)$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДИ РАССЕЯНИЯ ИССЛЕДУЕМЫХ ОБЪЕКТОВ

Для определения ЭПР исследуемых объектов $\sigma(\psi, f) = |S(\psi, f)|^2$ по их радиоизображениям необходимо выполнить преобразование, обратное оператору синтеза РЛИ (1):

$$S(\psi, f) = \int_0^{p_{\max}} \int_0^{2\pi} s(p, \varphi) e^{-j4\pi \frac{f}{c} p \cos(\varphi - \psi)} dp d\varphi, \quad (10)$$

Шкала интенсивности ЛЦР на РЛИ должна быть предварительно прокалибрована в единицах ЭПР [4, 6].

На практике, из-за применения алгоритмов интерполяции сигнала из прямоугольных координат пространственных частот, при работе с РЛИ, синтезированным в широком угловом секторе, такое преобразование может приводить к существенным погрешностям при восстановлении сигнала.

Вместе с тем, сравнимое с оптическим разрешение РЛИ позволяет представить исследуемый объект в виде совокупности его элементов – ЛЦР, полагая, что общее рассеяние объекта для произвольного угла облучения – это сумма сигналов, вызванных отражением и взаимным переотражением от этих ЛЦР. Под ЛЦР при этом понимается источник рассеяния, для которого при используемом разрешении не могут быть выделены более мелкие элементы объекта [1].

В настоящей работе для проверки работоспособности алгоритма коррекции РЛИ исследуемых объектов использована упрощенная модель исследуемого объекта в виде набора независимых точечных отражателей. Такая модель может быть построена на основе анализа местоположения и уровней отражения ЛЦР исследуемого объекта на РЛИ.

Согласно модели ЭПР исследуемого объекта на частоте f под углом локации ψ можно получить из выражения

$$S(\psi, f) = \left| \sum_{k=1}^N \sqrt{\sigma_k} e^{j4\pi \frac{f}{c} (z_k \cos \psi + x_k \sin \psi)} \right|^2, \quad (11)$$

где N – количество ЛЦР объекта;

σ_k – уровень эффективной площади рассеяния k -го ЛЦР;

z_k, x_k – координаты k -го ЛЦР по дальности и поперек соответственно, в системе координат, связанной с центром вращения объекта;

c – скорость света.

Выражение (11) справедливо для ограниченной полосы перестройки частоты и углового сектора синтеза РЛИ.

РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для проверки предлагаемого метода была разработана модель объекта, состоящего из девяти независимых отражателей одинаковой интенсивности, расположенных в виде линейной эквидистантной решетки с шагом 25 см.

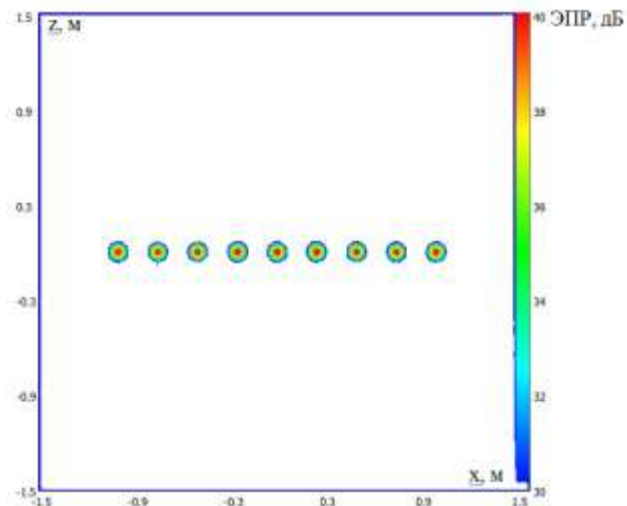


Рис. 3. Радиолокационное изображение эквидистантной решетки в дальней зоне локации

Результат синтеза РЛИ в дальней зоне локации в частотном диапазоне 8–12 ГГц и секторе синтезирования $\pm 13.5^\circ$ представлен на рис. 3.

При последующем расчете расстояние от фазового центра антенны до центра вращения объекта было уменьшено до 8 м, что соответствовало условиям проведения измерений в ближней зоне компактного полигона. Результат синтеза РЛИ в ближней зоне локации в частотном диапазоне 8–12 ГГц и секторе синтезирования $\pm 13.5^\circ$, представлен на рис. 4,а. Видно, что с увеличением расстояния от центра кадра РЛИ увеличивается смещение отражателей от их истинного положения, как по дальности, так и по поперечной координате. Геометрия объекта на РЛИ искажена. Результат восстановления диаграммы ЭПР

объекта на длине волны 3 см в сравнении с диаграммой, рассчитанной для дальней зоны локации приведен на рис. 5,а.

На рис. 4,б представлен результат коррекции РЛИ, синтезированного в ближней зоне локации, исправляющей геометрические искажения объекта. На рис. 5,б показана соответствующая диаграмма ЭПР на длине волны 3 см в сравнении с диаграммой, рассчитанной для дальней зоны локации.

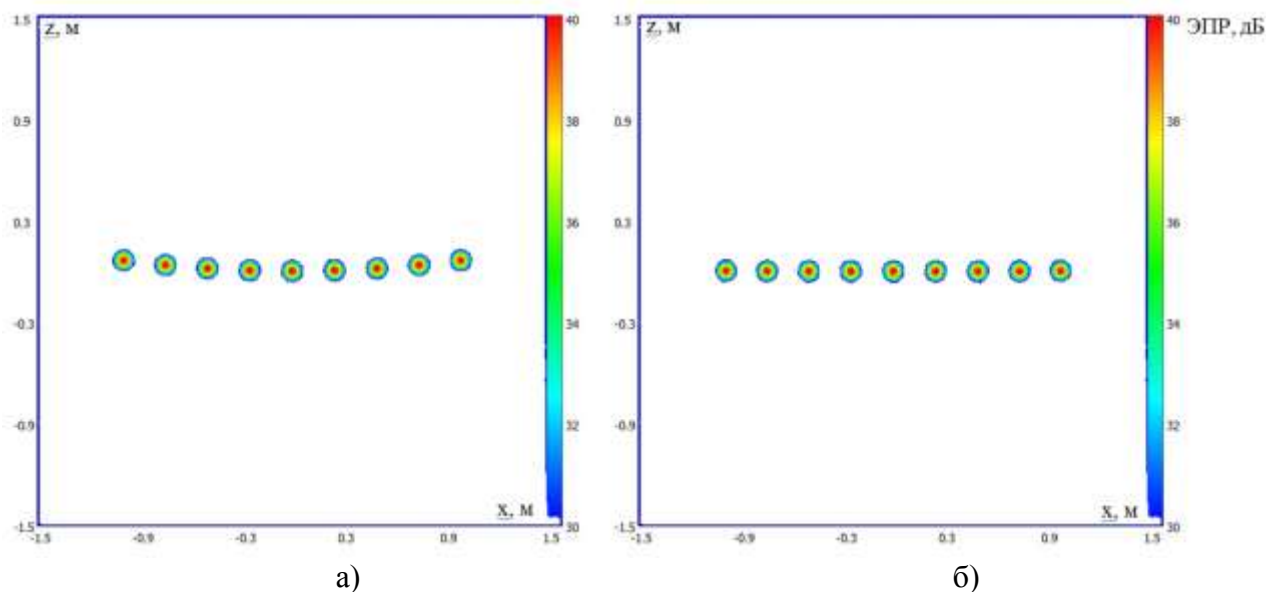


Рис. 4. Радиолокационное изображение эквидистантной решетки в ближней зоне локации без коррекции (а) и с коррекцией (б)

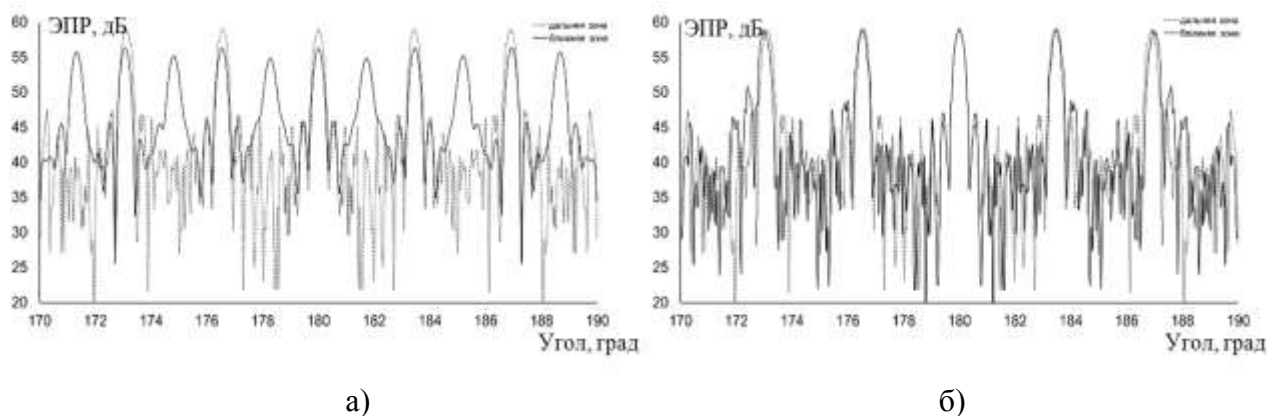


Рис. 5. Результаты восстановления диаграмм ЭПР объекта на длине волны 3 см по РЛИ в ближней зоне без коррекции (а) и с коррекцией (б)

Представленные результаты моделирования подтверждают возможность коррекции геометрических искажений на РЛИ, получаемых в ближней зоне локации.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА НА КОМПАКТНОМ ПОЛИГОНЕ

Экспериментальное подтверждение результатов математического моделирования было получено на компактном полигоне при помощи измерительной установки на базе векторного анализатора цепей в частотном диапазоне 8–12 ГГц. Объект измерений равномерно вращался в измерительном поле, формируемом широкополосными рупорными антеннами, расположенными на удалении 8,7 м.

В качестве объекта измерений использовалась линейная эквидистантная решетка из шести металлических сфер диаметром 10 см, расположенных с шагом 30 см (рис. 6). Общий размер объекта 1,5 м.

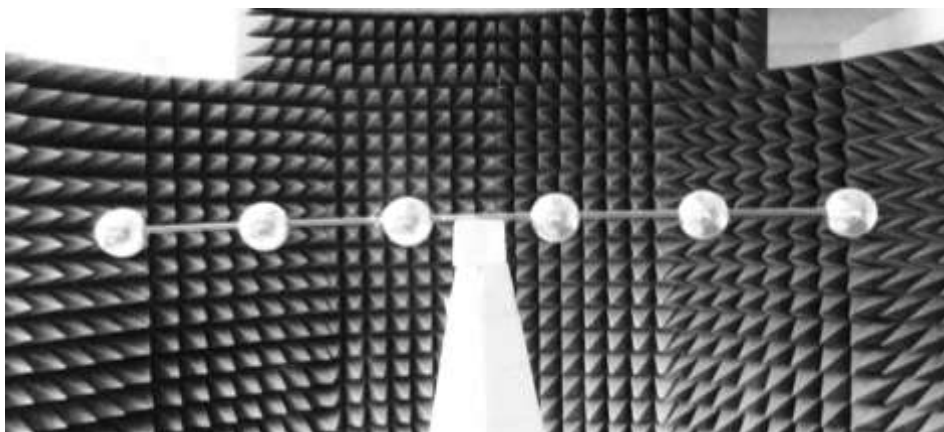


Рис. 6. Внешний вид объекта измерений

РЛИ объекта в угловом секторе $\pm 13,5^\circ$ представлено на рис. 7,а. Скорректированное РЛИ представлено на рис. 7,б.

Экспериментальные результаты подтверждают возможность коррекции геометрических искажений на РЛИ. Вместе с тем изображение остается искаженным по уровням отражений от отдельных ЛЦР из-за энергетического спада измерительного поля в ближней зоне локации. Спад поля может быть устранен путем проведения дополнительной коррекции РЛИ.

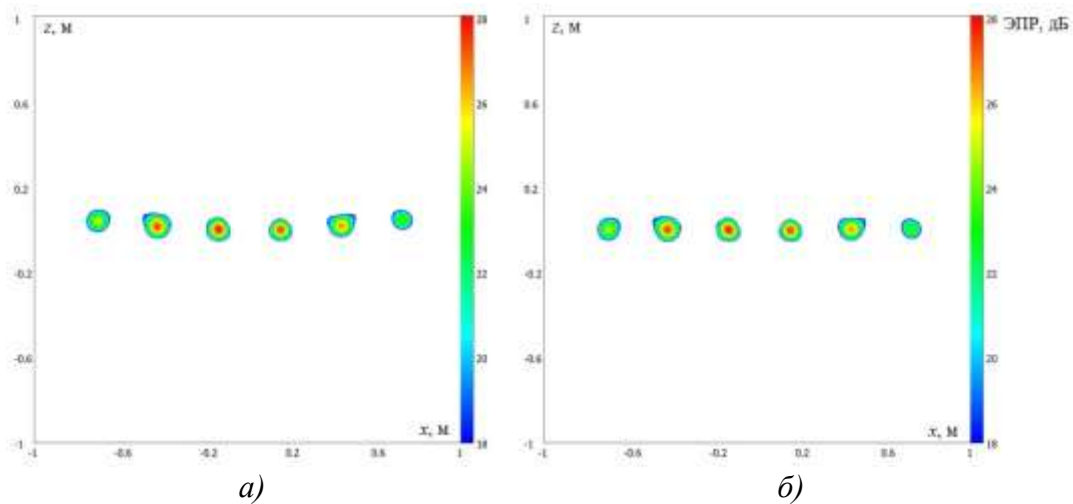


Рис. 7. Радиолокационное изображение объекта в ближней зоне локации без коррекции (а) и с коррекцией (б)

На рис. 8 показана диаграмма ЭПР объекта, измеренная на длине волны 3 см, в сравнении с диаграммой, рассчитанной для дальней зоны локации. Лепестковая структура измеренной диаграммы сильно искажена. Отличия мгновенных значений ЭПР превышают 10 дБ.

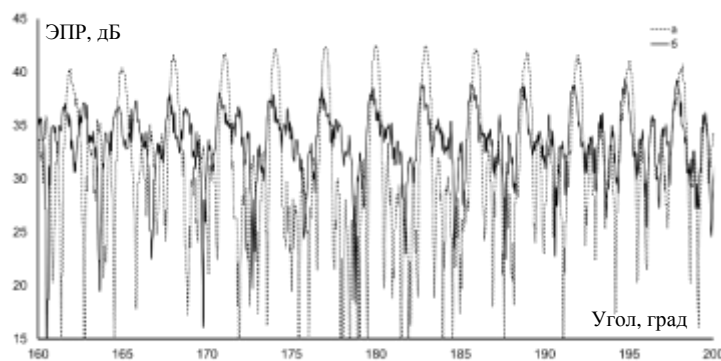


Рис. 8. Сравнение диаграмм ЭПР объекта на длине волны 3 см: а – расчет в дальней зоне; б – измерения в ближней зоне

На рис. 9 показана диаграмма ЭПР объекта на длине волны 3 см, сформированная по результатам коррекции РЛИ, в сравнении с диаграммой, рассчитанной для дальней зоны локации. Лепестковая структура диаграмм совпадает. Отличия мгновенных значений ЭПР в 3–5 дБ обусловлены не устраненным энергетическим спадом поля.

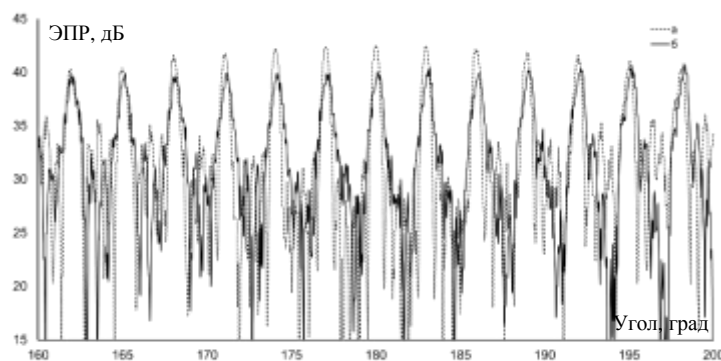


Рис. 9. Сравнение диаграмм ЭПР объекта на длине волны 3 см: а – расчет в дальней зоне; б – измерения в ближней зоне, скорректированные по РЛИ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные результаты подтверждают возможность коррекции геометрических искажений РЛИ объектов, синтезированных по результатам измерения в ближней зоне локации.

Для формирования РЛИ и диаграмм ЭПР, соответствующих получаемым в дальней зоне локации, необходимо выполнение дополнительной коррекции энергетического спада измерительного поля.

Метод может использоваться для контроля амплитудно-фазовых характеристик измерительного поля и повышения точности измерений ЭПР в существующих безэховых камерах и на РИК.

Список используемых источников

1. Методы исследования радиолокационных характеристик объектов : моногр. / под ред. С. В. Ягольникова. – М. : Радиотехника, 2012. – 296 с.
2. Компактные полигоны для измерения характеристик рассеяния объектов : моногр. / под общ. ред. Н. П. Балабухи. – М. : Наука, 2007. – 265 с.
3. *Knott E. F., Shaeffer J. F., Tuley M. T. Radar Cross Section.* – 2nd ed. – SciTech Pub., NC, 2004. – 626 p.
4. Радиолокационные характеристики объектов. Методы исследования : моногр. / под ред. С. М. Нестерова. – М. : Радиотехника, 2015. – 311 с.
5. *Mensa D. L. High Resolution Radar Cross-Section Imaging.* – Boston-London : Artech House, 1991. – 206 p.
6. *Озеров М. А.* Градуирование радиолокационных изображений в единицах эффективной площади рассеяния на основе равенства Парсеваля // Вестник метролога. – 2014. – № 2. – С. 17–21.

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

ОЦЕНКИ ЭМПИРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЫСОТЫ НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ ОБЛАЧНОСТИ ДЛЯ РАЙОНА г. САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

Обобщены исследования предшественников в области прогнозирования высоты нижней границы облачности (ВНГО) при отсутствии инструментальных метеорологических измерений. Приведены результаты численных экспериментов по оцениванию климатических характеристик этого параметра облачности для района г. Санкт-Петербург. Показана практическая применимость эмпирических методов прогнозирования ВНГО с учетом физико-географических условий района прогнозирования и сезона года.

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

ВВЕДЕНИЕ

Прогноз различных характеристик облаков (общего количества, высоты нижней границы, вертикальной протяженности и т. д.) всегда являлся важной и достаточно сложной задачей. Особо значимой среди них считается прогноз высоты нижней границы облаков (ВНГО), что объясняется следующими причинами.

Во-первых, прогноз ВНГО относится, в основном, к облакам нижнего яруса (слоистым (St), слоисто-кучевым (Sc), разорванно-слоистым (St-fr), разорванно-дождевым (Frnb)), находящимся в слое атмосферы от земной поверхности до 2000 м и довольно часто имеющим высоту нижней границы до 300 м. Вследствие этого данные о ВНГО необходимы, прежде всего, для обеспечения безопасности полетов авиации.

Во-вторых, данные о ВНГО в значительной мере позволяют объективно судить (особенно в период холодного полугодия) о наличии над местом наблюдения полей волнистообразных облаков (в частности, St-Sc), оказывающих существенное влияние на загрязненность крупных городов (особенно мегаполисов), а также о возможности решения различного рода прикладных задач (проведения авиакосмического мониторинга, осуществления поисково-спасательных работ и т. д.).

В-третьих, сложность прогнозирования ВНГО обусловлена, в определенной степени, также неоднородностью строения их нижнего основания. Обычно оно состоит из мелких капель, количество и размеры которых увеличиваются с высотой. Нижнее основание облака не является ровной и резко очерченной поверхностью, а представляет собой некоторое пространство с постепенным ухудшением видимости с высотой (например, как это наблюдается при переходе дымки в туман). Даже над равнинной местностью колебания нижней границы облаков достигают 80–100 м, особенно это проявляется при наличии под основным слоем облаков еще и облаков разорванных форм. При измеренном значении ВНГО 100 м колебания могут достигать до 40–50 м, при 200 м – до 100 м и более. Кроме того, высота облаков испытывает и более медленные изменения, при которых поднимается и опускается весь облачный слой со всеми неровностями. Такие колебания имеют амплитуду до 100 м, а период (время от высоты одного минимума/максимума до другого) – от 1 до 3 часов [5].

В-четвертых, при отсутствии инструментальных измерений в метеорологии возникает необходимость использования для прогнозирования метеорологических величин и атмосферных явлений (равно как и характеристик облаков, включая ВНГО) различных физико-статистических методов, к которым относятся и эмпирические. На основе глубокого анализа существующих в метеорологии физико-статистических методов прогнозирования ВНГО в статье обобщены те из них, которые показали свою достаточную оправдываемость на практике.

Данные прогноза ВНГО, наряду с данными о температуре воздуха и температуре поверхности земли, могут являться основой для разработки метода оценивания пригодности переохлажденных волнистообразных облаков (St-Sc) для модифицирования с целью их рассеяния без использования материалов самолетного зондирования атмосферы.

Известно, что термин «эмпиризм» образовался от греческого слова «εμπειρία», которое переводится как «опыт» [1]. Эмпирический метод прогнозирования метеорологического параметра – это метод, полученный опытным путем на основе многочисленных данных наблюдений за значениями этого параметра. В метеорологии такие методы применяются в случаях, когда в заданном районе отсутствует возможность производства инструментальных метеорологических наблюдений.

Следует отметить, что в литературе имеются работы ряда авторов, посвященные вопросам не только прогнозирования облаков, но и вопросам прогнозирования их ВНГО [2–5, 9].

В связи с этим целью настоящей работы является оценивание возможности использования эмпирических (физико-статистических) методов прогнозирования ВНГО ряда предшественников при отсутствии инструментальных метеорологических измерений, применяемых к конкретному физико-географическому региону (ФГР).

В качестве такого ФГР в работе взят г. Санкт-Петербург. Выбор данного региона обусловлен тем, что в г. Санкт-Петербурге находится крупный международный аэропорт (Пулково-II), а также один из крупнейших российских аэропортов (Пулково-I) с интенсивными режимами работы. Санкт-Петербург является также крупнейшим промышленным центром Северо-Западного региона, где требуется проведение большого комплекса работ по экологическому мониторингу, на качество которых будут оказывать негативное влияние облака нижнего яруса.

Для проведения необходимых исследований имеется обширная база данных по наземным метеорологическим наблюдениям, что позволяет получить статистически значимые результаты.

ХАРАКТЕРИСТИКА ИСХОДНОГО МАТЕРИАЛА И МЕТОДИКА ЕГО ОБРАБОТКИ

Основным исходным материалом для выполнения настоящей работы являлись результаты наземных наблюдений за 2005–2016 гг. по станции № 26063 (г. Санкт-Петербург). Характеристика исходного материала представлена на рис. 1. Данные были взяты с открытого источника «Погода в мире» (<http://m.rp5.ru>) в формате электронных таблиц *Microsoft Excel*. Объем выборки составил более 34000 значений в виде восьмисрочных наблюдений за период с 1.02.2005 по 31.12.2016 г.

Методика отбора необходимых данных осуществлялась следующим образом.

С помощью встроенных средств пакета вычислений *Microsoft Excel* был построен временной ряд с дискретностью 1 сут. Каждым календарным суткам соответствовали наиболее часто встречающиеся в течение дня типы облаков, их средняя ВНГО, средняя влажность воздуха, среднее количество наблюдавшихся облаков по ярусам, или фиксировалось их отсутствие. Наличие или отсутствие осадков не учитывалось. Таким образом была подготовлена основа для статистического анализа исходных данных.

	A	B	C	D	E	F	G	R	S	T	U	V	W
1	# Метеостанция Санкт-Петербург, Россия, WMO_ID=26063, выборка с 0												
2	# Кодировка: UTF-8												
3	# Информация предоставлена сайтом "Расписание Погоды", rp5.ru												
4	# Пожалуйста, при использовании данных, любезно указывайте название												
5	# Обозначения метеопараметров см. по адресу http://rp5.ru/archive.php												
6	#												
7	Местное время в С	T	Pd	P	Pa	U	Cl	Nh	H	Cm	Ch	VV	Td
8	31.03.2023 09:00	-0,5	755,1	755,5	-0,6	83	Слоисто-кучевые, образовавшиеся	100%	300-600			10,0	-3,0
9	31.03.2023 06:00	-1,3	755,7	756,1	-1,0	86	Слоистые разорванные или кучевы	100%	300-600	Высокослоистые нел		4,0	-3,3
10	31.03.2023 03:00	-1,3	756,7	757,0	-1,0	86	Слоисто-кучевые, образовавшиеся	100%	300-600			10,0	-3,4
11	31.03.2023 00:00	-1,5	757,7	758,2	-1,2	85	Слоистые разорванные или кучевы	100%	300-600	Высокослоистые нел		4,0	-3,7
12	30.03.2023 21:00	-1,6	758,9	759,3	-0,4	82	Слоистые разорванные или кучевы	100%	300-600	Высокослоистые нел		4,0	-4,3
13	30.03.2023 18:00	-0,5	759,3	759,7	-1,0	51	Слоисто-кучевых, слоистых, кучевы	70 – 80%	2500 или	Высококу	Перистые	10,0	-9,4
14	30.03.2023 15:00	0,5	760,3	760,6	-0,9	48	Слоисто-кучевых, слоистых, кучевы	Облаков н	2500 или	Высококу	Перистые	10,0	-9,3
15	30.03.2023 12:00	-1,1	761,2	761,5	0,5	58	Слоисто-кучевых, слоистых, кучевы	Облаков н	2500 или	Высококу	Перистые	10,0	-8,5
16	30.03.2023 09:00	-5,0	760,7	761,2	0,5	80	Слоисто-кучевых, слоистых, кучевы	Облаков н	2500 или	Высококу	Перистые	10,0	-7,9
17	30.03.2023 06:00	-7,4	760,2	760,6	0,8	88	Слоисто-кучевых, слоистых, кучевы	Облаков н	2500 или	Высококу	Перистые	10,0	-9,1
18	30.03.2023 03:00	-4,8	759,4	759,8	0,6	79	Слоисто-кучевых, слоистых, кучевы	20–30%	2500 или	Высококу	Перистых	10,0	-7,9
19	30.03.2023 00:00	-3,7	758,8	759,1	0,8	82	Слоисто-кучевые, образовавшиеся	100%	300-600			10,0	-6,4
20	29.03.2023 21:00	-2,4	758,0	758,4	0,8	86	Слоисто-кучевые, образовавшиеся	100%	300-600			10,0	-4,4
21	29.03.2023 18:00	-1,7	757,2	757,6	-0,3	93	Слоистые разорванные или кучевы	100%	300-600	Высокослоистые нел		4,0	-2,7
22	29.03.2023 15:00	-1,6	757,5	757,9	0,8	92	Слоистые разорванные или кучевы	100%	200-300	Высокослоистые нел		2,0	-2,7
23	29.03.2023 12:00	-0,7	756,7	757,1	0,3	92	Слоистые разорванные или кучевы	100%	300-600	Высокослоистые нел		4,0	-1,9
24	29.03.2023 09:00	-1,3	756,4	756,7	0,9	94	Слоистые разорванные или кучевы	100%	300-600	Высокослоистые нел		4,0	-2,1
25	29.03.2023 06:00	-1,4	755,5	755,8	0,3	95	Слоистые разорванные или кучевы	100%	200-300	Высокослоистые нел		4,0	-2,1
26	29.03.2023 03:00	-0,9	755,2	755,6	0,3	95	Слоистые разорванные или кучевы	100%	200-300	Высокослоистые нел		10,0	-1,6
27	29.03.2023 00:00	-0,1	754,9	755,2	-0,3	94	Слоистые разорванные или кучевы	100%	300-600	Высокослоистые нел		4,0	-0,9
28	28.03.2023 21:00	0,2	755,2	755,6	-1,0	94	Слоистые разорванные или кучевы	100%	300-600	Высокослоистые нел		4,0	-0,7

Рис. 1. Фрагмент представления исходных данных для анализа

ОЦЕНКИ КОСВЕННЫХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСОТЫ НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ ОБЛАКОВ

Анализ существующих косвенных методов определения ВНГО показал, что они в основном применимы в условиях неконвективной облачности, и их качество зависит от сезона года.

По данным К. Г. Абрамович [6], в слое от земли до 800 м облака появляются при дефиците точки росы $d \leq 2^\circ\text{C}$. При дефиците точки росы $d \leq 3^\circ\text{C}$ облака устойчиво существуют, а при значениях $d > 4^\circ\text{C}$ – размываются.

Непосредственные оценки Л. С. Дубровиной [7] позволяют судить о наличии облаков нижнего яруса (до 2000 м) по критерию $d \leq 1,6^\circ\text{C}$. Оправдываемость прогнозов ВНГО по такому критерию в зимние месяцы составляет около 85%, а летом она уменьшается до 51%, что сопоставимо с качеством методов других исследователей, например, методом Е. Н. Арабей [8].

В табл. 1 представлены результаты проверки косвенных методов определения высоты нижней границы облаков нижнего яруса для района г. Санкт-Петербург по данным наземных наблюдений на станции № 26063 (г. Санкт-Петербург) за 2005–2016 гг. вне зависимости от сезона года.

Таблица 1

Оценки повторяемости различных высот нижней границы облаков нижнего яруса в зависимости от значений дефицита точки росы у земли, г. Санкт-Петербург (все сезоны), %

Высота облаков, м	Дефицит точки росы, °С					
	$\leq 1,0$	$\leq 1,6$	1,1 – 2,0	2,1 – 3,0	3,1 – 4,0	$> 4,0$
≤ 200	50,7	39,6	24,1	6,20	2,30	0,50
≤ 300	79,4	74,8	65,8	47,9	31,6	12,5
≤ 600	85,8	82,5	76,2	66,7	56,8	40,0
≤ 1000	86,4	83,3	77,5	69,5	60,0	44,8
≤ 2000	86,5	83,4	77,6	69,9	60,3	45,5

Из анализа данных табл. 1 видно, что с ростом дефицита точки росы повторяемость низкой облачности быстро уменьшается. Приведенные оценки согласуются с оценками К. Г. Абрамович и Л. С. Дубровиной.

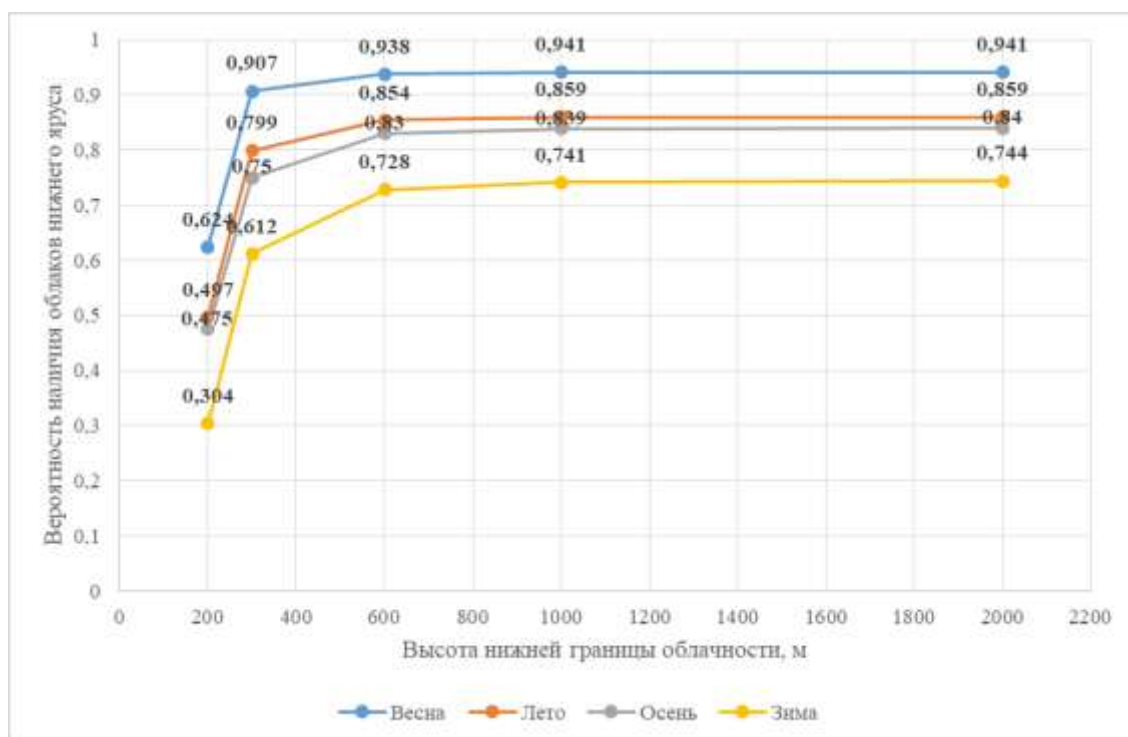


Рис. 2. Оценки вероятностей различных высот нижней границы облаков нижнего яруса при значениях дефицита точки росы у земли $\leq 1^\circ\text{C}$, г. Санкт-Петербург (раздельно по сезонам)

При дефиците точки росы $\leq 1^\circ\text{C}$ во все сезоны года в Санкт-Петербурге с вероятностью 0,87 наблюдается облачность нижнего яруса (рис. 2). Низкая облачность (до 300 м) также часто наблюдается во все сезоны года с вероятностью ее появления не менее 0,6.

ОЦЕНКИ МЕТОДА ПРОГНОЗА ВЫСОТЫ НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ ОБЛАКОВ Г. Я. НАРОВЛЯНСКОГО

Для практических целей Г. Я. Наровлянский [9] предложил рассчитывать повторяемость различных градаций высоты облаков – относительную и абсолютную.

Относительная повторяемость – это выраженное в процентах отношение числа случаев с облаками данной высоты к общему числу измеренных высот облаков.

Абсолютная повторяемость – есть выраженное в процентах отношение числа случаев с облаками данной высоты к общему числу всех наблюдений, включая как случаи наличия, так и случаи отсутствия облаков.

Относительная повторяемость менее удобна для использования, чем абсолютная, так как, например, если на двух станциях относительная повторяемость низкой облачности одинакова, то это не означает, что с одинаковой вероятностью можно ожидать низкую облачность на этих станциях. Абсолютная повторяемость позволяет судить о вероятности появления в данный период облаков соответствующей высоты. Так как абсолютная повторяемость может быть вычислена лишь на основании регулярных ежедневных измерений (по разным причинам регулярность измерений облаков часто нарушается), на практике приходится ограничиваться вычислением относительной повторяемости, а абсолютную повторяемость вычислять косвенным путем.

В работе показано, что косвенным путем абсолютную повторяемость различных значений высоты нижней границы низкой облачности можно получить, если есть данные о многолетней повторяемости общего количества облаков 8–10 баллов. Основанием для этого является наличие удовлетворительной корреляционной связи между повторяемостью различных значений высоты облаков нижнего яруса и повторяемостью общей облачности 8–10 баллов. Так, коэффициент корреляции между повторяемостью общей облачности 8–10 баллов (P_{8-10}) и абсолютной повторяемостью облаков с высотой нижней границы менее 1000 м ($P_{\text{абс}(H_{\text{нго}} < 1 \text{ км})}$) равен 0,94, а для облаков с высотой нижней границы менее 600 м ($P_{\text{абс}(H_{\text{нго}} < 0,6 \text{ км})}$) – 0,85. Для вычисления указанной абсолютной повторяемости низких облаков автором [9] получены эмпирические формулы:

$$P_{\text{абс}(H_{\text{нго}} < 1 \text{ км})} = 1,22 \cdot P_{8-10} - 27,8; \quad (1)$$

$$P_{\text{абс}(H_{\text{нго}} < 0,6 \text{ км})} = 1,03 \cdot P_{8-10} - 30,8. \quad (2)$$

Формулы (1) и (2) применимы для равнинной местности с умеренно влажным климатом.

После проверки для района г. Санкт-Петербург метода расчета абсолютной повторяемости облаков с высотой нижней границы менее 1000 и 600 м, предложенного Г. Я. Наровлянским, в соответствующие выражения для расчета были внесены поправки к первому коэффициенту, после чего формулы (1) и (2) приняли следующий вид:

$$P_{\text{абс}(H_{\text{нго}} < 1 \text{ км})} = 1,25 \cdot P_{8-10} - 27,8; \quad (3)$$

$$P_{\text{абс}(H_{\text{нго}} < 0,6 \text{ км})} = 1,25 \cdot P_{8-10} - 30,8. \quad (4)$$

Внесение поправок осуществлялось методом подбора, который состоит в следующем.

Все данные наблюдений за общим количеством облаков группируются по какому-либо признаку, например, по значениям дефицита точки росы, как это продемонстрировано в табл. 1, или по сезонам года, времени суток и т. п. Для каждой группы рассчитываются значения \bar{P}_{8-10} , а затем $\bar{P}_{\text{абс}(H_{\text{нго}} < 1 \text{ км})}$, $\bar{P}_{\text{абс}(H_{\text{нго}} < 0,6 \text{ км})}$ и ошибки повторяемостей на основе данных фактического распределения высоты нижней границы облачности по градициям заданных высот.

Далее выбирается одна группа, где значения ошибок наименьшие из всех остальных групп, и изменяется первый коэффициент в формулах (3) и (4) с шагом 0,01 в большую или меньшую сторону; при этом анализируются значения ошибок. Изменение первого коэффициента осуществляется до тех пор, пока значение ошибки не достигнет своего минимального положительного значения, либо не будет равно шагу. После того, как подбор осуществлен, вносятся изменения в формулы, которые для данной местности будут работать с достаточной для практики точностью.

Для Санкт-Петербурга метод Г. Я. Наровлянского, с учетом рассчитанных местных поправок, дает следующие результаты (табл. 2, 3).

Таблица 2

Абсолютные повторяемости облаков с высотой нижней границы менее 1000 м и менее 600 м при различных значениях дефицита точки росы у земли, г. Санкт-Петербург, %

Показатель	Дефицит точки росы, °С					
	≤ 1,0	≤ 1,6	1.1 – 2.0	2.1 – 3.0	3.1 – 4.0	> 4.0
$P_{\text{абс}(H_{\text{нго}} < 1 \text{ км})}$	81,8	79,7	74,7	67,5	58,4	35,3
$P_{\text{абс}(H_{\text{нго}} < 0,6 \text{ км})}$	78,8	76,7	71,7	64,5	55,4	32,2

Таблица 3

**Абсолютные повторяемости облаков с высотой нижней границы менее 1000 м
и менее 600 м при значениях дефицита точки росы у земли $\leq 1^\circ\text{C}$,
г. Санкт-Петербург (раздельно по сезонам), %**

Сезоны года	$P_{\text{абс}}(H < 1 \text{ км})$	$P_{\text{абс}}(H < 0,6 \text{ км})$
Весна	83,3	80,3
Лето	63,7	60,7
Осень	78,1	75,1
Зима	91,8	88,8

На основании полученных данных можно констатировать следующее: метод Г. Я. Наровлянского применим для расчета абсолютных повторяемостей неконвективных облаков нижнего яруса с любой высотой нижней границы (в пределах до 2000 м) при наличии общей облачности 8–10 баллов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При отсутствии инструментальных наблюдений за ВНГО она может быть рассчитана эмпирическим путем, при наличии основных параметров атмосферы, указывающих на наличие облачности нижнего яруса: общего количества облаков, температуры воздуха и температуры точки росы.

При общей оценке ВНГО в заданном районе при $d \leq 2^\circ\text{C}$ в каждый сезон года можно ожидать наличия облачности нижнего яруса, для г. Санкт-Петербурга – низкую облачность до 300 м. При $2 < d \leq 4^\circ\text{C}$ наблюдается облачность с высотой нижней границы 600–2000 м в 60–70% случаев. При $d > 4^\circ\text{C}$ облачность нижнего яруса наблюдается крайне редко.

Прогноз ВНГО нижнего яруса тесно связан с общим количеством облаков (N) и целесообразен, когда $N = 8 - 10$ баллов. Тогда, используя метод Г. Я. Наровлянского, можно установить эмпирические зависимости между повторяемостью общей облачности 8–10 баллов и абсолютной повторяемостью облаков с высотой нижней границы менее 1500; 1000; 800; 600; 400 метров и т. д. Проведение такого рода работ является предметом дальнейших исследований.

Для прогнозирования параметров конвективных облаков рассмотренные в статье методы не дают удовлетворительных результатов.

Список используемых источников

1. Современный словарь иностранных слов. – СПб. : Комета, 1994. – 740 с.
2. Руководство по практическим работам метеоподразделений авиации Вооруженных сил. – М. : Воениздат, 1992. – 487 с.
3. Руководство по прогнозированию метеорологических условий для авиации / под ред. К. Г. Абрамович, А. А. Васильевой. – Л. : Гидрометеоиздат, 1985. – 301 с.
4. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. – Л. : Гидрометеоиздат, 1965. – Ч. 2. – 492 с.
5. Баранов А. М., Солонин С. В. Авиационная метеорология. – Гидрометеоиздат, 1975. – 392 с.
6. Абрамович К. Г. Некоторые особенности распределения метеорологических элементов в нижней части тропосферы в облачные и безоблачные дни // Труды ЦИП. – 1964. – Вып. 136. – С. 3–11.

7. *Дубровина Л. С., Верзунова В. Д.* Об использовании дефицита точки росы для определения вероятности облаков на различных высотах // Труды ВНИИГМИ-МЦД. – М. : Гидрометеиздат, 1979. – Вып. 65. – С. 79–86.
8. *Арабей Е. Н.* Данные радиозондирования, как средство выявления облачных слоев // Метеорология и гидрология. – 1975. – № 6. – С. 32–37.
9. *Наровлянский Г. Я.* Авиационная климатология : моногр. – Л. : Гидрометиздат, 1968. – 267 с.

А. В. Астапович,
кандидат технических наук, доцент;
А. С. Зуев;
Д. А. Куничкин;
А. В. Прокофьев,
кандидат технических наук, доцент

МОДЕЛЬ ИСКАЖЕНИЙ КООРДИНАТНОГО ПРОСТРАНСТВА СК-42 ДЛЯ ВЫСОКОТОЧНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ КООРДИНАТ В СИСТЕМУ ПЗ-90.11

В данной статье обосновывается подход к решению проблемы высокоточного преобразования координат между системами координат ПЗ-90.11 и СК-42. Анализируя взаимосвязи между системами координат и разными формами представления положения точки в пространстве, авторы приходят к выводу, что модель искажений координатного пространства, подобно уклонению отвесных линий, целесообразно представлять углами между нормальными к отсчетным эллипсоидам в меридиане и первом вертикале. Особое внимание в статье уделяется алгоритму построения цифровой модели искажений геодезической сети СК-42 и изучению методами геостатистики неортогональных деформаций координатного пространства. На основании экспериментального исследования для разных условий набора данных поведения линии тренда сделан вывод, что экстраполяция не позволяет исключать ошибки в преобразованных координатах на недоступной территории. Для представления в едином высокоточном координатном пространстве геодезических и картографических данных, получаемых спутниковыми методами космической геодезии, средствами ДЗЗ и классическими методами наземной геодезии, авторы предлагают в материалах, созданных на основе деформированной системы координат СК-42, неортогональные искажения исключать методами геостатистики, а трансформирование геодезических и картографических данных, исполненных в ПЗ-90.11, выполнять ортогональными преобразованиями с использованием глобальных параметров.

Ключевые слова: геостатистика, координатное пространство, нелинейное трансформирование, система координат, цифровая модель искажений, цифровая модель поправок.

ВВЕДЕНИЕ

При выполнении в интересах обороны страны геодезических и картографических работ требуется решение задачи трансформирования координат из системы ПЗ-90.11 в систему СК-42.

Проблема высокоточного преобразования координат заключается в том, что системы СК-42 и ПЗ-90.11 создавались в разное историческое время независимыми методами и распространены независимыми геодезическими сетями, построенными на основе разнородных наборов измерительной информации. Из-за влияния неизбежных и количественно неопределенных погрешностей измерений элементов геодезических сетей между результатами геодезических и картографических работ, исполненных на основе государственных геодезических сетей (ГГС) СК-42 и ПЗ-90.11, нет строгой функциональной зависимости. То есть, зная координаты геодезического пункта в одной системе отсчета, невозможно, используя ортогональные преобразования

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{ПЗ-90.11}} = (1 - m) \cdot \begin{bmatrix} 1 & +\omega_z & -\omega_y \\ -\omega_z & 1 & +\omega_x \\ +\omega_y & -\omega_x & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{СК-42}} + \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix}, \quad (1)$$

безошибочно указать координаты данного пункта в другой системе отсчета. Между преобразованными и заданными в каталогах координатами будет наблюдаться невязка, которая может достигать десятков метров. Невязки координат обуславливаются в основном внутренни-

ми деформациями геодезической сети СК-42, под которыми понимаются те ошибки координат, которые в результате ортогонального преобразования с использованием усредненных значений параметров трансформирования не могут быть исключены.

В формуле (1) использованы следующие обозначения:

ΔX , ΔY , ΔZ – линейные элементы трансформирования систем координат при переходе из системы СК-42 в систему ПЗ-90.11, м;

ω_x , ω_y , ω_z – угловые элементы трансформирования систем координат при переходе из системы СК-42 в систему ПЗ-90.11, м, рад;

m – масштабный элемент трансформирования систем координат при переходе из системы СК-42 в систему ПЗ-90.11.

В [2] приведены значения элементов трансформирования (табл. 1).

Таблица 1

Элементы трансформирования системы СК-42 в систему ПЗ-90.11, эпоха 2010.0

Параметры	ΔX , м	ΔY , м	ΔZ , м	ω_x , 10^{-3} угл. сек.	ω_y , 10^{-3} угл. сек.	ω_z , 10^{-3} угл. сек.	m , 10^{-6}
Значения параметров	+23,557	-140,844	-79,778	-2,300	-346,460	-794,210	-0,228

Система координат СК-42 несет на себе отпечаток всех деформаций ГГС, созданной в соответствии с требованиями [1].

При преобразовании координат из системы СК-42 в систему ПЗ-90.11 по формуле (1) с использованием параметров трансформирования (табл. 1) в вычисленных координатах сохраняются все внутренние не ортогональные деформации исходной системы. И наоборот, координаты, определенные в менее деформированной системе отсчета ПЗ-90.11 с использованием параметров трансформирования (табл. 1), могут быть пересчитаны в систему координат СК-42 с наименьшими общими смещениями и внутренними деформациями, свойственными системе координат ПЗ-90.11.

Таким образом, параметры трансформирования (табл. 1) не позволяют адекватно описать все многообразие существующих деформаций системы координат СК-42 относительно ПЗ-90.11. В любом практическом случае такого преобразования вычисленные значения координат будут отличны от реальных значений.

Целью данной работы является поиск путей представления в единой высокоточной системе координат геопространственной информации на основе математической модели неортогональных искажений координатного пространства СК-42, создаваемой методами геостатистики.

**ПОСТРОЕНИЕ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ НЕОРТОГОНАЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ
КООРДИНАТНОГО ПРОСТРАНСТВА СК-42**

Для повышения точности преобразования координат могут применяться численные методы трансформирования, использующие цифровые модели искажения более деформированной системы координат относительно менее деформированной системы отсчета.

С точки зрения построения и использования цифровых моделей любые деформации геодезических построений могут рассматриваться как следствие деформаций соответствующих им систем координат. И наоборот, деформации систем координат, независимо от причин их появления, могут интерпретироваться как деформации геодезических построений, выполненных в недеформированных системах.

Если предположить существование двух систем координат с разным характером и уровнем деформаций, для которых по координатам общих пунктов построена цифровая модель

поправок для преобразования координат, то такое преобразование будет обладать следующим свойством. В результатах преобразования будут воспроизводиться деформации той системы, в которую выполняется преобразование, и исключаться деформации исходной системы координат. Степень воспроизведения деформаций будет зависеть от того, насколько координаты общих пунктов, использованных для построения модели поправок, адекватно отражают «рельеф» дифференциальных деформаций двух сопоставляемых систем координат.

Построение цифровой модели неортогональных деформаций координатного пространства СК-42 предполагает наличие двух наборов координат совмещенных пунктов, представляемых в системе ПЗ-90.11 и системе СК-42.

ПЗ-90.11 является системой геодезических параметров «Параметры Земли 1990 года», отнесенной к эпохе 2010.0. Она включает в себя:

- фундаментальные геодезические постоянные;
- параметры общеземного эллипсоида;
- систему координат ПЗ-90.11, закрепляемую координатами пунктов космической геодезической сети, пунктами ФАГС, ВГС и СГС-1;
- характеристики модели гравитационного поля Земли;
- глобальные параметры ортогонального трансформирования геоцентрической системы координат ПЗ-90.11 в референционные системы координат России и зарубежные системы координат.

Теоретическое определение системы координат ПЗ-90.11 основывается на следующих положениях:

- начало системы координат расположено в центре масс Земли;
- ось Z направлена к условному земному полюсу (международному условному началу);
- ось X лежит в плоскости начального астрономического меридиана, установленного Международной службой вращения Земли и систем отсчета (*IERS*) и Международным бюро времени;
- ось Y дополняет систему до правой системы координат.

Геодезические координаты относятся к общеземному эллипсоиду (ОЗЭ), размеры и форма которого определяются значениями большой полуоси и сжатия.

Центр ОЗЭ совпадает с началом системы координат ПЗ-90.11, ось вращения эллипсоида – с осью Z , а плоскость начального меридиана – с плоскостью XOZ .

За отсчетную поверхность в системе геодезических параметров ПЗ-90.11 принята поверхность общеземного эллипсоида с большой полуосью $a_{ПЗ} = 6378136$ и сжатием $\alpha_{ПЗ} = 1/298,25784$.

СК-42 является референционной системой координат, реализованной в виде ГГС, закреплявшей систему координат на территории СССР, и государственной нивелирной сети, распространенной на всю территорию страны систему нормальных высот (Балтийская система), исходным началом которой является нуль Кронштадтского футштока.

Начало и направление осей системы координат СК-42 не совпадают с началом и направлением осей системы координат ПЗ-90.11 (см. табл. 1).

Геодезические координаты в СК-42 относятся к эллипсоиду Красовского, размеры и форма которого определяются значениями большой полуоси $a_{Кр}$, равной 6378245 м, и сжатия $\alpha_{Кр}$, равного 1/298,3.

Положение точки в системах ПЗ-90.11 и СК-42 может быть представлено в виде пространственных прямоугольных или эллипсоидальных координат, либо в виде плоских прямоугольных координат и высот.

В специализированном справочнике [2] приведены все необходимые математические связи между разными формами представления координат.

Пространственные прямоугольные координаты (X, Y, Z) точек на поверхности эллипсоида связаны с эллипсоидальными координатами (B, L) соотношениями:

$$\operatorname{tg} L = \frac{Y}{X}, \quad \operatorname{ctg} B = \frac{D}{Z} (1 - e^2),$$

где D – проекция вектора на плоскость экватора (экваториальное расстояние),
 $D = \sqrt{X^2 + Y^2}$;

e^2 – квадрат эксцентриситета, $e^2 = 2\alpha - \alpha^2$ (где α – сжатие эллипсоида).

Таким образом, изменение сжатия эллипсоида будет вызывать изменение широты пункта. С другой стороны, плоские прямоугольные координаты в проекции Гаусса – Крюгера являются функциями широты, долготы и параметров эллипсоида. Следовательно, изменение параметров эллипсоида вызывает изменение плоских координат пункта и тем самым обуславливает деформацию системы координат.

Кроме того, эллипсоиды в теле Земли ориентированы по-разному. Поэтому для одной и той же точки физической поверхности Земли к разным эллипсоидам относятся разные нормали. Угол между нормальными к отсчетным эллипсоидам ПЗ-90.11 и СК-42 будем называть сближением нормалей, и обозначать буквой u . По величине сближения нормалей можно судить о величине искажений координатного пространства СК-42 относительно ПЗ-90.11. По аналогии представления уклонения отвесной линии [3], сближение нормалей можно разложить на составляющие: ξ_0 – сближение нормалей в меридиане и η_0 – сближение нормалей в первом вертикале.

Следовательно, различие ориентаций отсчетных эллипсоидов СК-42 и ПЗ-90.11 в теле Земли так же вызывает деформацию системы координат. Кроме того, геодезические сети, распространяющие системы координат, из-за влияния погрешностей измерений их элементов подвержены искажениям, изучение которых возможно по разностям координат совмещенных пунктов.

Таким образом, основная идея построения модели искажений координат СК-42 относительно ПЗ-90.11 может быть представлена в виде

$$V = X_{\text{ПЗ-90.11}} - X_{\text{СК-42}},$$

где $X_{\text{ПЗ-90.11}}$ – пространственные, эллипсоидальные или плоские координаты точек в системе ПЗ-90.11;

$X_{\text{СК-42}}$ – пространственные, эллипсоидальные или плоские координаты соответствующих точек в системе СК-42;

V – разности пространственных, эллипсоидальных или плоских координат точек.

Положение объекта в трехмерном пространстве определяет система трех величин (X, Y, Z) , а на поверхности отсчетного эллипсоида и на плоскости – система двух величин (B, L) и (x, y) . Связь между разными формами представления положения точки в пространстве в какой-либо из систем координат осуществляется через эллипсоидальные координаты и параметры отсчетного эллипсоида. В этой связи модель искажений СК-42 относительно ПЗ-90.11 целесообразно представлять двумерными величинами в виде сближения нормалей в меридиане и первом вертикале (ξ_0, η_0) , которые связаны с эллипсоидальными координатами соотношениями [3]:

$$\xi_0 = B_{\text{ПЗ-90.11}} - B_{\text{СК-42}};$$

$$\eta_0 = (L_{\text{ПЗ-90.11}} - L_{\text{СК-42}}) \cos B_{\text{ПЗ-90.11}}. \quad (2)$$

Так как ξ_0 и η_0 в своем составе содержат систематические составляющие, которые обусловлены размерами и ориентаций отсчетных эллипсоидов СК-42 и ПЗ-90.11 относительно друг друга, то их можно исключить. Тогда совокупность значений:

$$\delta_{\xi} = \xi_0 - \Delta B;$$

$$\delta_{\eta} = \eta_0 - \Delta L \cos B_{\text{ПЗ-90.11}} \quad (3)$$

будут выражать неортогональные искажения геодезической сети распространяющей систему координат СК-42 относительно системы ПЗ-90.11.

Величины δ_{ξ} и δ_{η} будем называть аномалиями сближений нормалей к эллипсоидам в меридиане и первом вертикале соответственно.

Разности эллипсоидальных координат ΔB и ΔL , которые обусловлены размерами и ориентацией отсчетных эллипсоидов, могут быть вычислены по стандартным формулам М. С. Молоденского [2]:

$$\begin{aligned} \Delta B = & \frac{\rho''}{M+H} \left[\frac{N}{a} e^2 \sin B \cos B \Delta a + \left(\frac{N^2}{a^2} + 1 \right) N \sin B \cos B \frac{\Delta e^2}{2} - \right. \\ & \left. - (\Delta X \cos L + \Delta Y \sin L) \sin B + \Delta Z \cos B \right] - \omega_x \sin L (1 + e^2 \cos 2B) + \\ & + \omega_y \cos L (1 + e^2 \cos 2B) - \rho'' m e^2 \sin B \cos B, \end{aligned}$$

$$\Delta L = \frac{\rho''}{(N+H) \cos B} (\Delta X \sin L + \Delta Y \cos L) \pm \operatorname{tg} B (1 - e^2) \cdot (\omega_x \cos L + \omega_y \sin L) - \omega_z$$

где $\Delta B, \Delta L$ – поправки к геодезической широте и геодезической долготе (угл. сек.) к эллипсоидальным координатам СК-42;

B, L – геодезическая широта и геодезическая долгота пункта в системе СК-42;

$\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ – линейные элементы трансформирования систем координат при переходе из системы СК-42 в систему ПЗ-90.11 (м);

$\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – угловые элементы трансформирования систем координат при переходе из системы СК-42 в систему ПЗ-90.11 (угл. сек.);

m – масштабный элемент трансформирования систем координат при переходе из системы СК-42 в систему ПЗ-90.11;

M – радиус кривизны меридиана,

$$M = \frac{a(1 - e^2)}{\sqrt{(1 - e^2 \sin^2 B)^3}};$$

N – радиус кривизны первого вертикала,

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}};$$

$$\rho'' = 206264,80625.$$

В приведенных формулах a и e^2 составляют

$$a = \frac{a_{\text{СК-42}} + a_{\text{ПЗ-90.11}}}{2}, \quad e^2 = \frac{e_{\text{СК-42}}^2 + e_{\text{ПЗ-90.11}}^2}{2},$$

а Δa и Δe^2 составляют

$$\Delta a = a_{\text{ПЗ-90.11}} - a_{\text{СК-42}}, \quad \Delta e^2 = e_{\text{ПЗ-90.11}}^2 - e_{\text{СК-42}}^2,$$

где $a_{\text{ПЗ-90.11}}$ и $a_{\text{СК-42}}$ – большие полуоси эллипсоидов в системах координат ПЗ-90.11 и СК-42;

$e_{ПЗ-90.11}^2$ и $e_{СК-42}^2$ – квадраты эксцентриситетов эллипсоидов в системах координат ПЗ-90.11 и СК-42 соответственно.

На рис. 1 приведен альтернативный вариант блок-схемы алгоритма вычисления ΔB и ΔL .

В представленной диаграмме $(X_0, Y_0, Z_0)_{СК-42}$ и $(X_0, Y_0, Z_0)_{ПЗ-90.11}$ являются пространственными прямоугольными координатами точек проекций геодезических пунктов на поверхности отсчетных эллипсоидов СК-42 и ПЗ-90.11 соответственно.

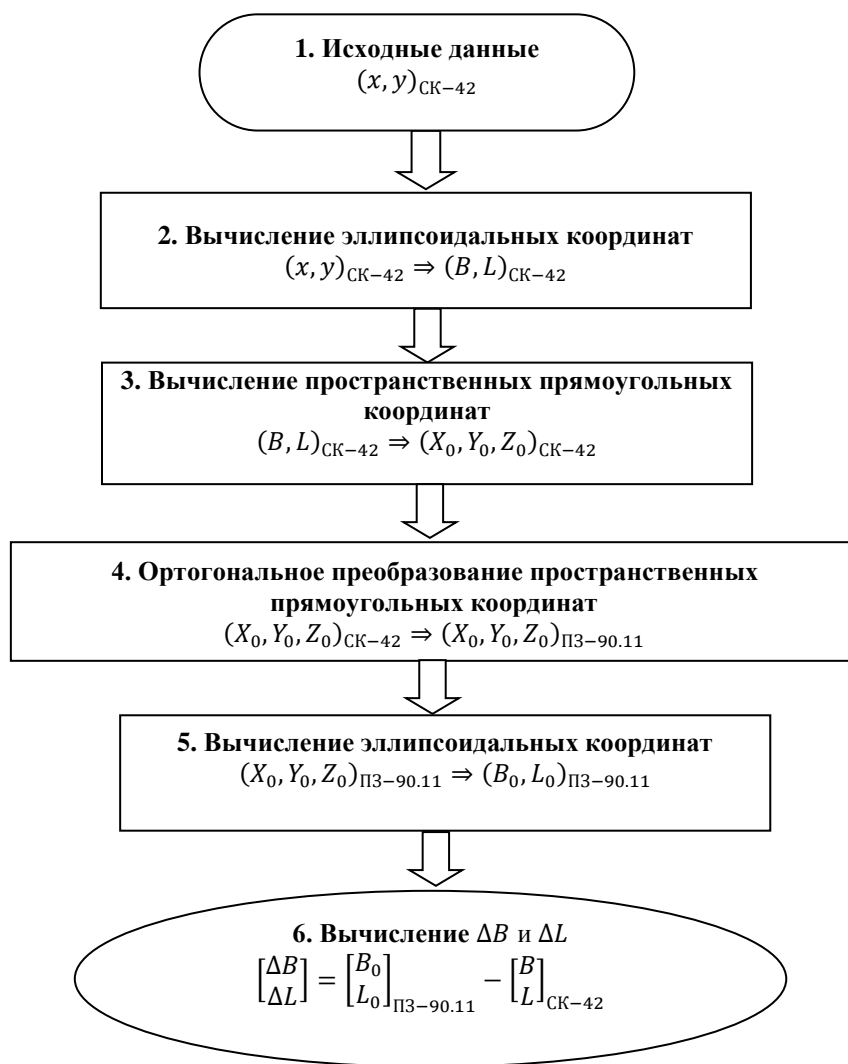


Рис. 1. Альтернативный вариант алгоритма вычисления ΔB и ΔL

Исходными данными для построения цифровой модели искажений координатного пространства СК-42 относительно ПЗ-90.11 выступают эллипсоидальные координаты одноименных геодезических пунктов, представляемых в независимых каталогах координат СК-42 и ПЗ-90.11. Если каталоги геодезических пунктов СК-42 и ПЗ-90.11 представлены в иных формах координат, то по приведенным в [2] формулам выполняется перевычисление геодезических данных в эллипсоидальные координаты.

Блок-схема алгоритма построения цифровой модели искажений координатного пространства СК-42 относительно ПЗ-90.11 приведена на рис. 2.

Таким образом, аномалии δ_{ξ} , δ_{η} можно рассматривать некоторыми функциями $\delta_{\xi} = f_{\xi_0}(B, L)$ и $\delta_{\eta} = f_{\eta_0}(B, L)$ широт B и долгот L , которые заданы на дискретном множестве геодезических пунктов T_1, T_2, \dots, T_n , (табл. 2).

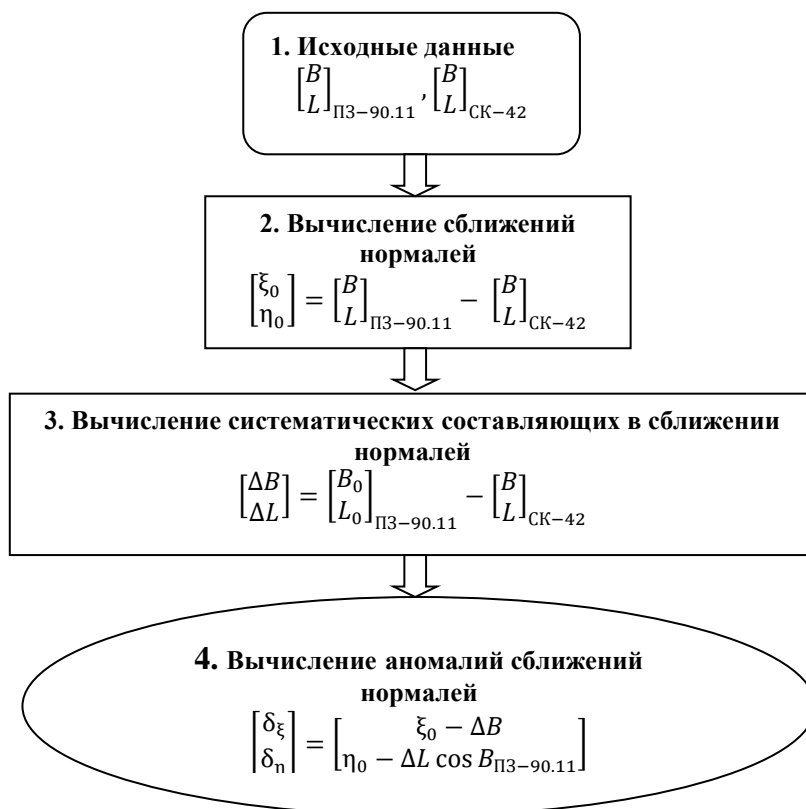


Рис. 2. Блок-схема алгоритма вычисления аномалий сближений нормалей

Таблица 2

Значения аномалий сближений нормалей

T	T_1	T_2	...	T_n
δ_ξ	δ_{ξ_1}	δ_{ξ_2}	...	δ_{ξ_n}

T	T_1	T_2	...	T_n
δ_η	δ_{η_1}	δ_{η_2}	...	δ_{η_n}

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛОБАЛЬНЫХ ТРЕНДОВ В НАБОРЕ ДАННЫХ

Аномалии $\delta_\xi = f_{\xi_0}(B, L)$ и $\delta_\eta = f_{\eta_0}(B, L)$ являются пространственными переменными и при исследовании считаются случайными функциями, для которых имеются единственные реализации. Поскольку аномалии сближений нормалей получены на ограниченном количестве пунктов, то для извлечения информации об искажениях координатного пространства в точках, где не оценивались аномалии, необходимо создать модель. Выделяют несколько способов создания моделей, которые основаны на использовании инструментов геостатистики для решения задачи интерполяции – восстановления сплошного поля распределения случайной функции по ограниченному множеству данных в точках наблюдений. Предполагается, что функция априорно стационарна, т. е. среднее является константой.

Для получения предварительной информации о закономерностях в искажениях системы координат СК-42 имеющиеся данные δ_ξ и δ_η отображают на картограмме и получают информацию о равномерности расположения совмещенных пунктов. Более полную информацию несет в себе карта изолиний, составляемая по значениям аномалий сближения нормалей на совмещенных пунктах. Анализируя карту изолиний можно более определенно выделить зоны с повышенным и пониженным уровнем искажения системы координат СК-42.

Закономерности в пространственном распределении аномалий можно выявить, вычисляя меру сходства между членами последовательности данных табл. 2. При этом значения аномалий сравниваются между собой в некоторых перекрывающихся интервалах, полученных путем перемещения ряда данных относительно самого себя на определенный лаг.

Значения аномалий в ряду могут быть сдвинуты относительно себя на 1 лаг, 2 лага, 3 лага и т. д. За минимальную длину лага обычно принимается расстояние между наиболее приближенными пунктами. Если таким образом сравнивать ряд аномалий с самим собой, то появится возможность определить в каких-то положениях наилучшее соответствие, а в других положениях – наибольшее несоответствие. За меру соответствия обычно принимают автоковариацию. Автоковариация с лагом 0 будет являться дисперсией.

Пространственная корреляция между наблюдаемыми значениями аномалий δ_ξ или δ_η надежно устанавливается по графику вариограммы.

Мерой пространственной зависимости между распределенными данными в заданном направлении является вариограмма, которая определяется формулой

$$\gamma_h = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{i+h})^2,$$

где n – количество сравниваемых данных в лаге;

h – номер лага.

Для данного интервала расстояний вариограмма определяется как разность значений дисперсий и ковариаций. Если лаг является дисперсией, т. е. равен 0, тогда и значение вариограммы равно 0. С увеличением расстояния сравниваемые части последовательности данных становятся все менее похожими друг на друга и это приводит к большим значениям вариограммы. В итоге значение вариограммы достигает значения дисперсии, и больше не растет.

Вычисляя значения γ_h для разных лагов, можно построить график эмпирической вариограммы, возможный тип поведения которой приведен на рис. 3.

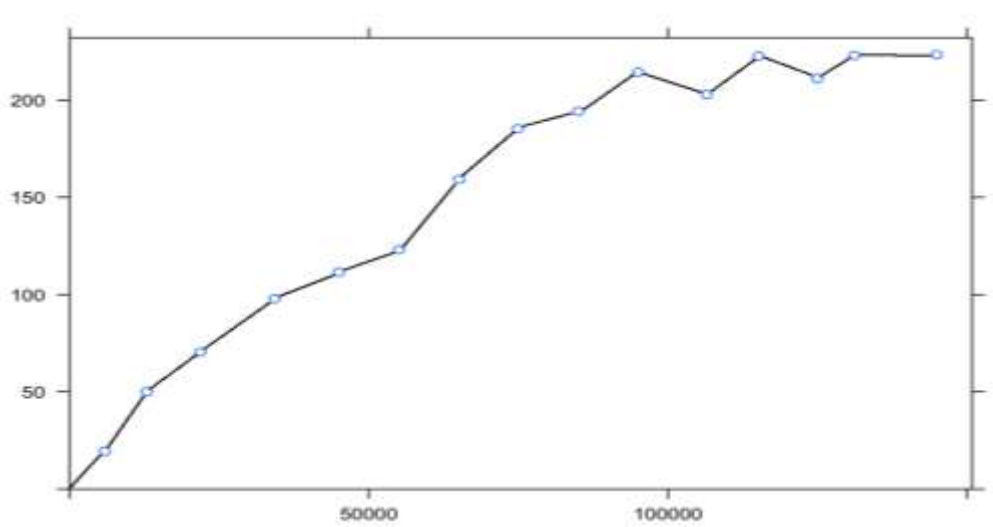


Рис. 3. График эмпирической вариограммы

Если число опорных пунктов велико, то для уменьшения числа совместно решаемых уравнений (6) и (7) необходимо выполнить группирование рядов данных δ_ξ и δ_η с установлением весов для средних значений $\bar{\delta}_{\xi_i}$ и $\bar{\delta}_{\eta_i}$ в каждом кластере. Тогда уравнения (6) и (7) составляются по средним значениям аномалий и средним значениям координат опорных пунктов для каждого кластера, а их решение выполняется с учетом весов, численно равных числу значений аномалий в каждом кластере:

$$a = (D^T P D)^{-1} D^T P \bar{\delta}_\xi;$$

$$b = (D^T P D)^{-1} D^T P \bar{\delta}_\eta,$$

где P – диагональная весовая матрица.

Порядок полинома определяется по характеру изменения поля аномалий сближения нормалей вдоль осей B и L и, как правило, принимается не более двух.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЛОБАЛЬНОГО ТРЕНДА В НАБОРЕ АНОМАЛИЙ СБЛИЖЕНИЯ НОРМАЛЕЙ К ЭЛЛИПСОИДАМ СК-42 И ПЗ-90.11 ВДОЛЬ ТРАССЫ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ М11

Экспериментальные исследования характера искажений координатного пространства СК-42 выполнялись для территории местности вдоль трассы автомобильной дороги М11 Москва – Санкт-Петербург.

На картограмме (рис. 4) отражено расположение геодезических пунктов, на которых известны аномалии δ_ξ и δ_η .

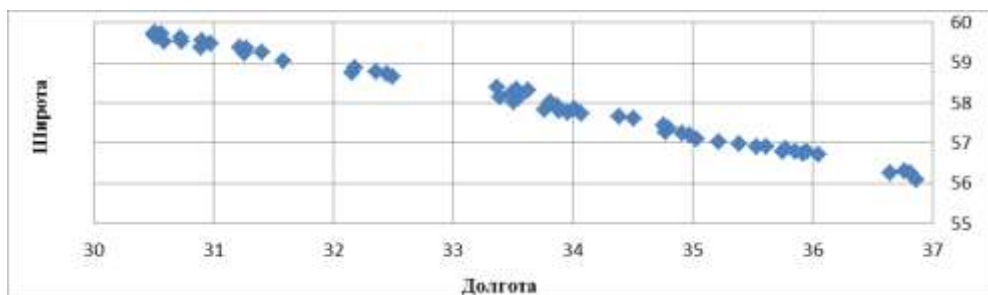


Рис. 4. Картограмма расположения опорных пунктов

Для установления пространственной корреляции между наблюдаемыми значениями аномалий δ_ξ или δ_η были построены графики эмпирических вариограмм (рис. 5 и 6).

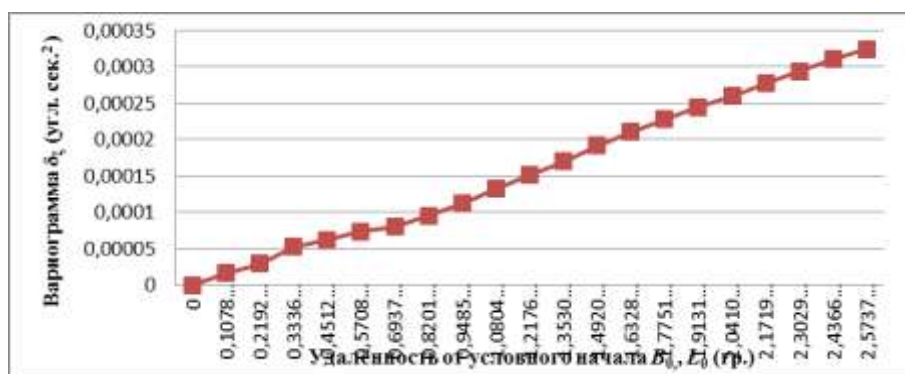


Рис. 5. График эмпирической вариограммы аномалий сближения нормалей в меридиане

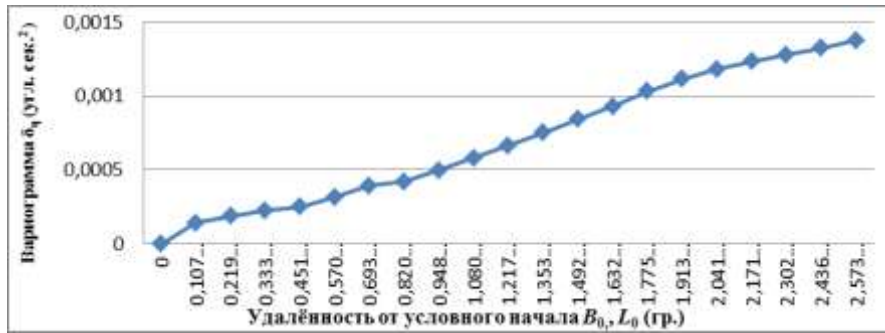


Рис. 6. График эмпирической вариограммы аномалий сближения нормалей в первом вертикале

На приведенных графиках наблюдаются беспороговые вариограммы.

Построение линий тренда в данных δ_ξ и δ_η выполнено инструментами программы Excel. Полученные графики аномалий сближения нормалей с уравнениями линии тренда представлены на рис. 7 и 8.

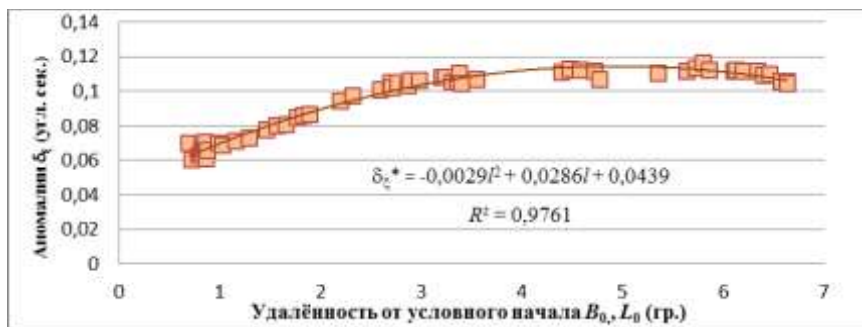


Рис. 7. График аномалий сближения нормалей в меридиане

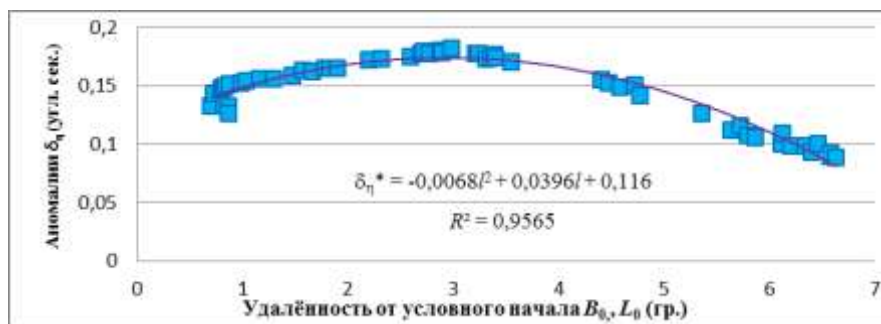


Рис. 8. График аномалий сближения нормалей в первом вертикале

Надежность приближения полученных полиномов к последовательностям δ_ξ и δ_η характеризуется величиной R^2 .

Для исследуемой территории средние квадратические отклонения аномалий сближения нормалей от линии трендов составляют в меридиане и первом вертикале соответственно 0,0044 и 0,0120 угл. сек. на эллипсоиде или 0,14 и 0,20 м на плоскости.

После исключения из данных δ_ξ и δ_η тренда получены значения остатков аномалий сближения нормалей на опорных пунктах, картограммы которых (рис. 9 и 10) свидетельствуют о стационарности функций $\Delta\delta_\xi = \delta_\xi - \delta_\xi^*$ и $\Delta\delta_\eta = \delta_\eta - \delta_\eta^*$.

Закономерности в пространственном распределении $\Delta\delta_\xi$ и $\Delta\delta_\eta$ отражают графики эмпирических вариограмм (рис. 11 и 12).

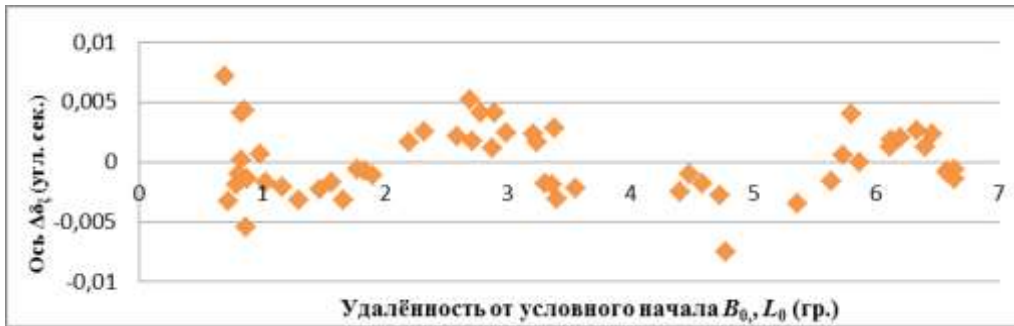


Рис. 9. Картограмма $\Delta\delta_\xi$



Рис. 10. Картограмма $\Delta\delta_\eta$

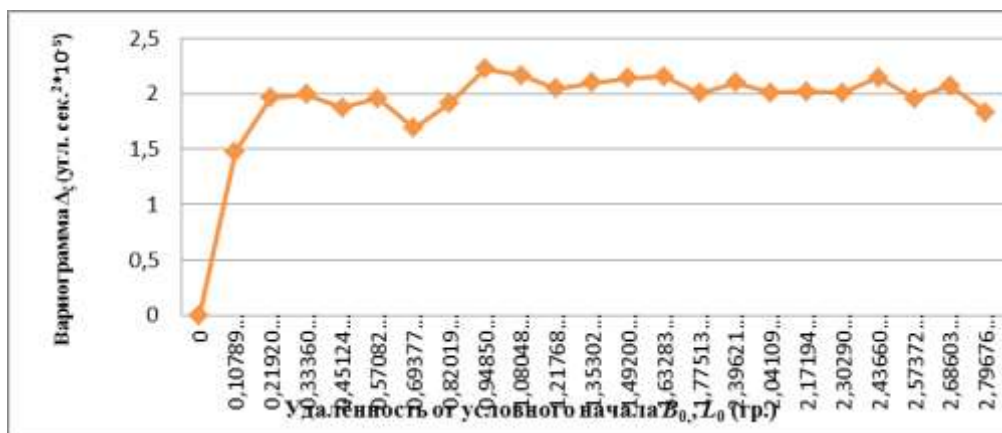


Рис. 11. График эмпирической вариограммы $\Delta\delta_\xi$

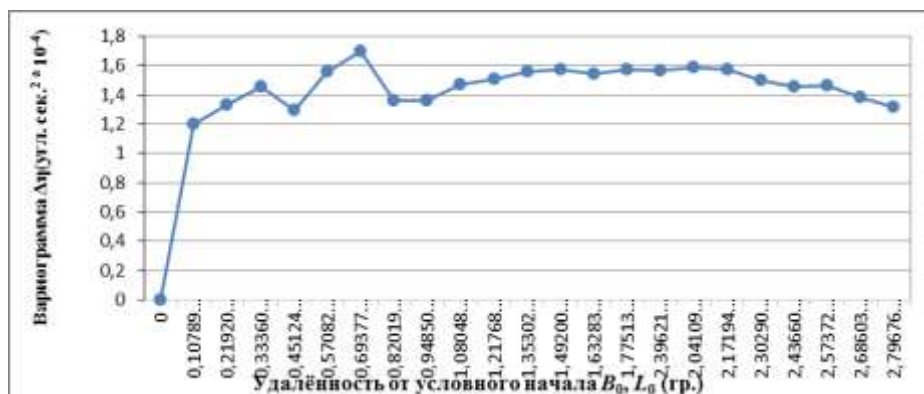


Рис. 12. График эмпирической вариограммы $\Delta\delta_\eta$

Из анализа поведения графиков эмпирических вариограмм остатков аномалий сближения нормалей видно, что окрестность, в пределах которой все значения данных $\Delta\delta_\xi$ или $\Delta\delta_\eta$ коррелированы между собой, составляет около $0,22^\circ$ на поверхности заемного эллипсоида, что составляет примерно 24,5 км.

Для эмпирических вариограмм остатков $\Delta\delta_\xi$ и $\Delta\delta_\eta$ подбираются правильные аппроксимирующие кривые, которые позволяют получать ковариационные функции для решения задачи интерполяции аномалий δ_ξ и δ_η .

Полученная модель тренда данных δ_ξ и δ_η была применена для исследования точности экстраполяции аномалий сближения нормалей на недоступной территории. На рис. 13–16 приведены графики отклонений аномалий от линии тренда, полученной по пространственным данным ограниченного участка трассы.

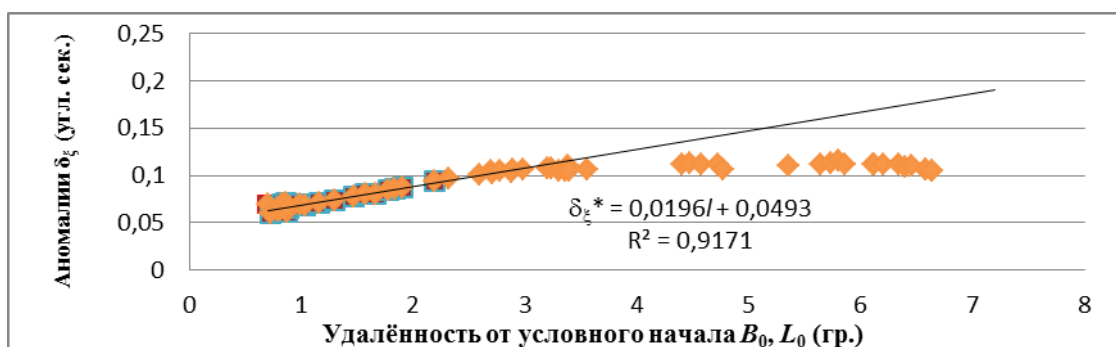


Рис. 13. Линейная экстраполяция аномалий δ_ξ

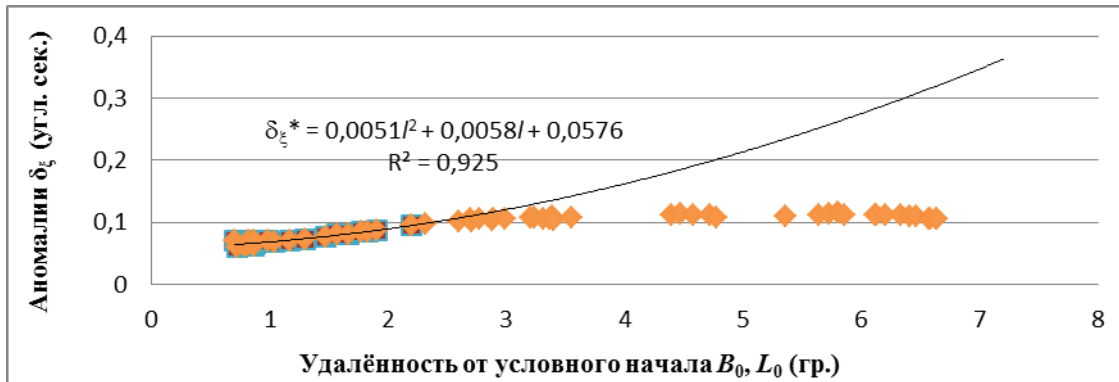


Рис. 14. Полиномиальная экстраполяция аномалий δ_ξ

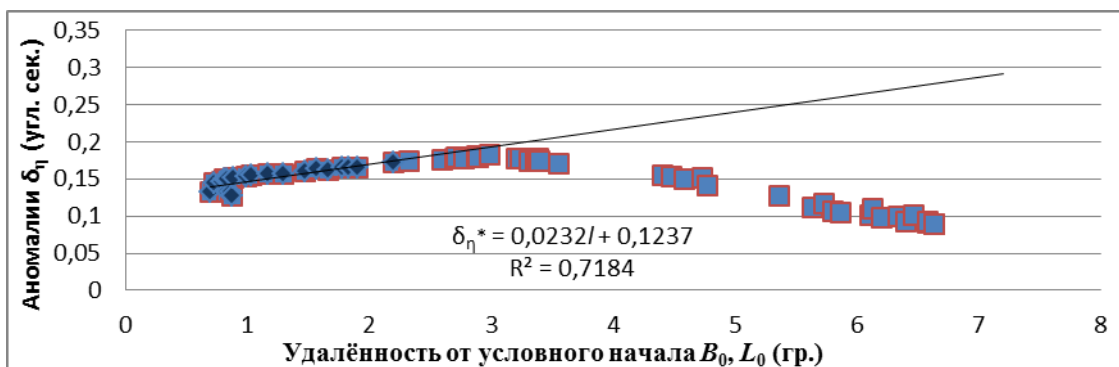


Рис. 15. Линейная экстраполяция аномалий δ_η

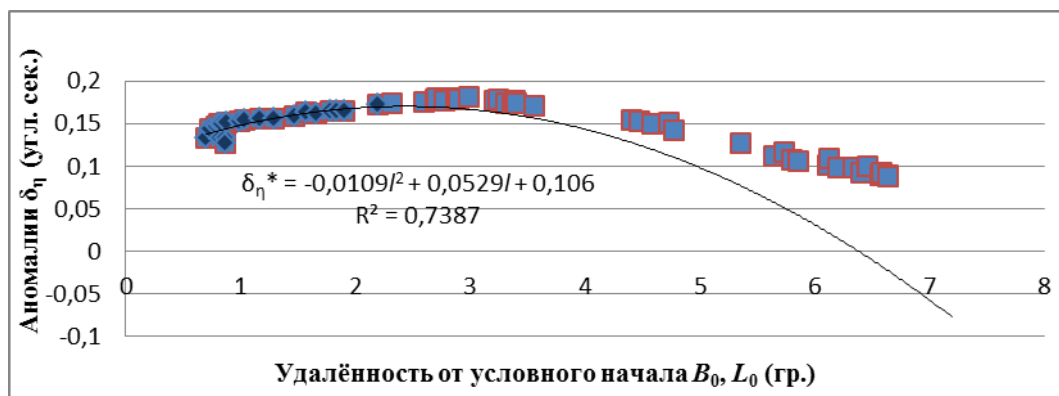


Рис. 16. Полиномиальная экстраполяция аномалий $\delta\eta$

Графики показывают, что точность экстраполяции резко падает с удалением от опорных пунктов участка трассы, на котором выполняется экстраполяция аномалий. Приемлемые результаты наблюдаются на удалении $1-2^\circ$ дуги нормального сечения эллипсоида по направлению трассы, что примерно составляет до 250 км на поверхности Земли.

Поскольку на недоступную территорию проблематично получить доброкачественные оценки аномалий сближения нормалей, то исключить ошибки в преобразованных координатах путем экстраполяции неортогональных искажений СК-42 не представляется возможным. Требуется иной подход решения задачи единства и точности координатного пространства. Особенно это актуально в военном деле, так как эффективность применения средств высокоточного оружия большой дальности зависит от точности и единства системы координат, в которой представляется геопространственная информация.

Геопространственная информация о рельефе и объектах местности на недоступной и доступной территориях может быть получена в разных системах координат. Так, например, спутниковыми методами космической геодезии и средствами дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) геопространственную информацию получают в геоцентрических системах координат ПЗ-90.11 или ITRF-2014, а на доступной территории, кроме того, в СК-42 методами классической геодезии.

При решении задач обороны страны геопространственная информация должна представляться в СК-42. С этой целью полученные материалы спутниковыми методами космической геодезии и средствами ДЗЗ предлагается ортогональными преобразованиями трансформировать в соответствии с требованиями [2] в требуемую систему координат. В результате без потери точности будут получены геопространственные данные в недеформированной СК-42.

Если же на доступную территорию имеются геодезические и картографические материалы, исполненные на основе геодезической сети СК-42, то они не будут согласованы с данными спутниковых определений и ДЗЗ на величину неортогональных искажений СК-42 в данном локальном районе. В этом случае для повышения точности согласования материалов, полученных в деформированном и недеформированном координатных пространствах, необходимо в материалах, созданных на основе деформированной системы координат СК-42, исключить неортогональные искажения, которые надежно оцениваются с использованием выше рассмотренной цифровой модели аномалий сближения нормалей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье предложен алгоритм построения математической модели искажений системы координат СК-42 относительно ПЗ-90.11, на основе которой раскрыт подход представления в едином высокоточном координатном пространстве геодезических и картографических данных, получаемых спутниковыми методами космической геодезии, средствами ДЗЗ и класси-

ческими методами наземной геодезии. При этом впервые неортогональные искажения СК-42 выражены аномалиями сближения нормалей к отсчетным эллипсоидам сопоставляемых систем координат, а для изучения характера пространственного распределения деформаций геодезической сети применены методы геостатистики.

Предложенный алгоритм экспериментально апробирован построением цифровой модели аномалий сближения нормалей вдоль трассы автомобильной дороги М11 Москва – Санкт-Петербург.

Исследования модели методами геостатистики выявили беспороговую вариограмму аномалий, которая обусловлена наличием тренда в пространственном распределении неортогональных деформаций системы координат СК-42. Полученные полиномы линии тренда надежно характеризуют распределение искажения координатного пространства только внутри исследуемого локального района. Экстраполяция же аномалий не позволяет уверенно исключать ошибки в преобразованных координатах на недоступной территории.

Для повышения точности согласования материалов, полученных в деформированном и недеформированном координатных пространствах, предложено в материалах, созданных на основе деформированной системы координат СК-42, исключать методами геостатистики неортогональные искажения, а трансформирование геодезических и картографических данных, исполненных в ПЗ-90.11, выполнять ортогональными преобразованиями в СК-42 с использованием глобальных параметров, которые определяют взаимную ориентацию координатных осей.

Список используемых источников

1. Инструкция о построении государственной геодезической сети СССР. – М. : Недра, 1966. – 345 с.
2. Параметры Земли 1990 года: спец. справочник ВТУ ГШ РФ. – М., 2020. – 64 с.
3. *Машимов М. М.* Уравнивание геодезических сетей. – М. : Недра, 1979. – 367 с.

Б. Ю. Никульшин,
кандидат технических наук;
А. В. Новиков,
кандидат технических наук;
А. С. Тимощук,
кандидат технических наук

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ РАДИОЗОНДОВЫХ ОБОЛОЧЕК С ПОДВЕШЕННОЙ СЪЕМОЧНОЙ АППАРАТУРОЙ

В статье приводятся результаты исследований возможности применения радиозондовых оболочек для подъема в атмосферу на требуемую высоту съемочной аппаратуры на примере камеры типа *First Person View* (FPV) и цифрового неметрического фотоаппарата для наблюдения подстилающей поверхности и получения цифровых изображений местности для создания геопространственной информации. Даются рекомендации по применению технических средств из состава радиолокационных передвижных метеорологических комплексов для выполнения пусков радиозондовых оболочек, оснащенных съемочной аппаратурой.

Ключевые слова: метеорологические радиозондовые оболочки, съемочная аппаратура, радиолокационный передвижной метеорологический комплекс, геопространственная информация.

ВВЕДЕНИЕ

Опыт ведения боевых действий в ходе специальных военных операций показал высокую эффективность применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для решения задач разведки, наведения, нанесения высокоточных огневых ударов и решения других задач [1]. Однако, наряду с неоспоримыми достоинствами этих современных высокотехнологичных аппаратов, они обладают и рядом недостатков. В частности, это высокая стоимость некоторых образцов БПЛА, значительные потери этих аппаратов вследствие применения противником противобеспилотного оружия и средств радиоэлектронной борьбы (РЭБ), ошибок пилотирования, технических неисправностей, неблагоприятных метеорологических условий полета. Наряду с высокой стоимостью, в качестве ограничений для их массового применения в войсках можно назвать ограничения производственных мощностей по выпуску и ремонту принятых на снабжение серийных БПЛА, а также необходимость специального обучения операторов БПЛА. В тоже время в войсках существует объективная потребность в дешевых, массовых и принятых на снабжение средствах для получения геопространственной информации (ГПИ), наблюдения, наведения, противодействия радиолокационным средствам противника, охраны позиционных районов, при этом важно, что такие средства могут быть развернуты на базе аэростатов и (или) войсковых метеорологических радиозондовых оболочек.

Во время Великой Отечественной войны привязные аэростаты активнейшим образом применялись войсками Красной Армии. Так, в годы войны в наших войсках в общей сложности насчитывалось около 3 тыс. аэростатных постов и более 50 тыс. человек личного состава (3 дивизии и 17 отдельных дивизионов аэростатов заграждения, 10 отдельных дивизионов аэростатов наблюдения, отдельный воздухоплавательный отряд ВДВ). Технологиями применения стратосферных аэростатов в то время владела только Япония. Она с их помощью наносила бомбовые удары по территории США [2].

В послевоенное время опытом Японии по использованию стратосферных аэростатов воспользовались США для ведения разведки над территорией СССР. Системой ПВО нашей страны за 20 лет (с 1956 по 1977 г.) было зафиксировано 4112 диверсионных аэростатов, а сбить удалось только 793. Пик активности запусков беспилотных дрейфующих аэростатов пришелся на январь-февраль 1956 г., когда в воздушное пространство СССР проникло около

3 тыс. шаров. Это было одним из основных поводов для начала интенсивного развития отечественной воздухоплавательной техники [2].

Большое внимание аэростатам уделялось в послевоенное время и в нашей стране. Была проделана огромная работа по разработке воздухоплавательной техники – с конца 50-х гг. прошлого века до начала двухтысячных годов было разработано и введено в строй три поколения аэростатов различного назначения (автоматические аэростаты-носители боевых средств, аэростаты-метеоразведчики, аэростаты-фоторазведчики, агитационные аэростаты, аэростаты-ретрансляторы связи, аэростат-лаборатория и др.) [2].

В настоящее время аэростаты используются во многих странах мира. Во время вооруженного конфликта в Ливии США активно использовали гелиевые аэростаты с высокотехнологичной начинкой, которые запускались с борта корабля и выполняли роль ретрансляторов, позволяя связаться с ушедшими за горизонт самолетами без использования спутниковой связи или самолетов АВАКС. Также США ведут разработки разведывательного аэростата и аэростатов по предупреждению о ракетном нападении [2].

В Японии проводятся измерения радиационного фона в атмосфере на больших высотах с помощью аэростата, чтобы иметь более точное представление о степени ее загрязнения в связи с аварией на АЭС «Фукусима-1». Многие фирмы европейских стран исследуют возможность создания стратосферных аэростатов, предназначенных для широкополосной связи, мониторинга местности. Назревает необходимость в передаче громадных потоков информации, так как в последние годы происходит взрывной рост мобильной телефонии и интернета, а существующие технологии (спутниковые и кабельные системы) подходят к пределу своих возможностей.

Актуальность применения аэростатов и устройств аналогичного принципа действия показали и последние события в США, когда американские ВВС и спецслужбы в течение недели «охотились», предположительно, за метеорологическим аэростатом Китая, который беспрепятственно пролетел над континентальной частью США и сбить который удалось ракетным оружием американского истребителя только над акваторией Тихого океана, когда аэростат опустился до высот порядка 19 км [3]. В зоне СВО уже также отмечены случаи применения подобных устройств [4], в частности, самодельные ложные радиолокационные уголкового отражатели, в качестве носителей для которых использовались радиозондовые оболочки (рис. 1).



Рис. 1. Радиозондовая оболочка с радиолокационными уголковыми отражателями (Донецкая область, февраль 2023 г.)

Цель работы: оценить возможность использования радиозондовых оболочек для подъема в атмосферу на требуемую высоту съемочной аппаратуры. Выполненные в этом направлении результаты исследований приведены ниже.

ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОЗОНДОВЫХ ОБОЛОЧЕК С КАМЕРОЙ (FPV)

В качестве одного из средств, аналогичного аэростатам, авторами предлагается применение радиозондовых оболочек [5] для подъема съемочной аппаратуры на примере разъемной камеры FPV для БПЛА. Камера FPV (*First Person View*) представляет собой систему получения видео изображения от камеры («первого лица») и передачи ее пилоту на устройство отображения (телефон, монитор, видеоочки) в режиме реального времени (рис. 2).

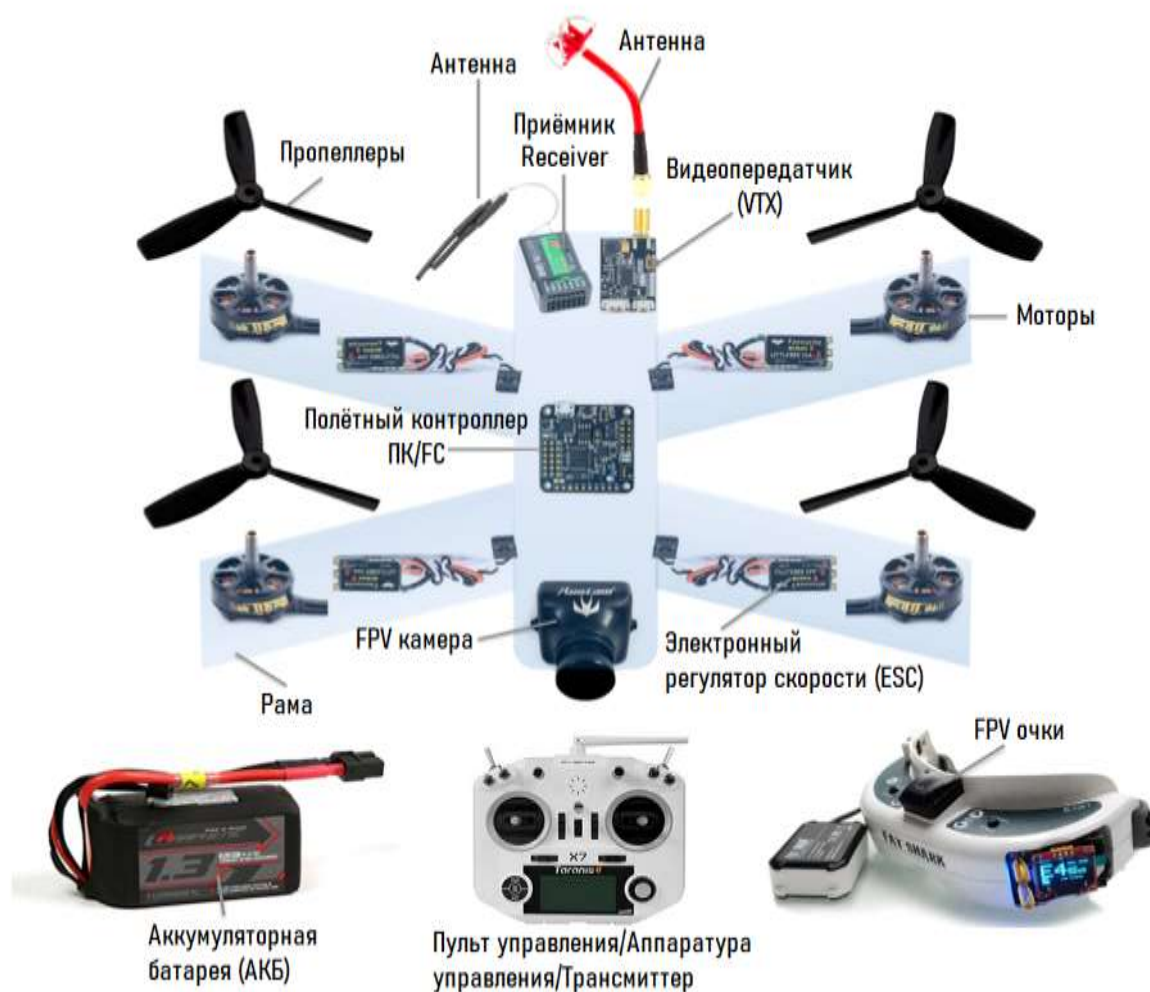


Рис. 2. Состав оборудования БПЛА с камерой FPV

К достоинствам радиозондовых оболочек, предлагаемых в качестве альтернативных средств подъема съемочной аппаратуры, можно отнести их невысокую стоимость и наличие их на снабжении в ВС РФ в составе радиолокационных передвижных метеорологических комплексов типа изделия 1Б-44 РПМК-1 «Улыбка» [5] или их более современных аналогов. Устройство и принцип действия таких оболочек схож с принципом и устройством аэростатов, но имеет гораздо меньшие размеры, что позволяет их использовать в качестве носителя полезной нагрузки до 2–2,5 кг и с высотой подъема до 20–30 км.

Применительно к задаче запуска оболочки с камерой FPV из состава оборудования радиолокационных передвижных метеорологических комплексов практический интерес представляет оборудование для хранения газа и оболочек, так как связь и управление камерой FPV осуществляются по стандартным каналам связи (wi-fi, радиочастотный канал, GSM канал сотовой связи) от камеры FPV на телефон, планшет, монитор или видеоочки. Выбор канала связи зависит от тактико-технических характеристик конкретного образца БПЛА и применяемой камеры FPV. Причем применяться также могут исправные камеры, снятые с неисправных (поврежденных) БПЛА, что дает возможность их повторного использования при подвесе к радиозондировочной оболочке.

В зависимости от назначения оболочки имеют различные размеры и массу. Они разделяются по номерам, которые соответствуют их диаметрам в наполненном, но не раздутом состоянии (табл. 1).

Таблица 1

Классификация аэрологических оболочек

№ оболочки	Масса оболочки, г	Диаметр, см	Свободная подъемная сила, г	Средняя высота подъема, км
10	10–15	45	35–40	3
20	30–40	75	200–230	7
30	75–90	90	300–350	13
100	360–450	160	2000–2200	18
150	800–950	175	2200–2500	23

Оболочки № 10, 20 и 30 применяют при шаропилотных наблюдениях, оболочки № 100 и 150 – при радиозондировании. Оболочки, применяемые при шаропилотных наблюдениях и радиозондировании, должны обладать малой газопроницаемостью и быть достаточно эластичными.

В 60-70-е гг. XX века оболочки производились из натурального каучука. Современные изготавливают из латекса (искусственного каучука), обладающего рядом преимуществ по сравнению с натуральным каучуком: он менее горюч, более стоек по отношению к растворителям и обладает меньшей газопроницаемостью. Экспериментально установлено, что при разрыве толщина оболочки составляет 0,005–0,01 мм, что соответствует высоте подъема 35–40 км. Однако такой высоты достигают не все из оболочек. Чаще всего разрыв происходит на высотах 20–25 км (табл. 1) [5].

Натуральный каучук подвержен воздействию озона и ультрафиолетовой радиации, но не теряет эластичности при низкой температуре. Поэтому для достижения наибольших высот зондирования в научно-исследовательских целях используются оболочки из натурального каучука.

Оболочки хранят в заводской упаковке, пересыпанными тальком. При длительном хранении они теряют упругие свойства, становятся малоэластичными. Для восстановления эластичности оболочки прогревают в течение 5–10 минут при температуре 80°C в термостате с завязанным «аппендиксом». Для восстановления эластичности оболочек большого размера (№ 100 и 150) их обрабатывают бензином или керосином. Для этого оболочку погружают на 2–3 минуты в емкость так, чтобы аппендикс остался не погруженным. Для наполнения оболочек используется водород или гелий.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВЫСОТЫ ПОДЪЕМА РАДИОЗОНДОВОЙ ОБОЛОЧКИ С КАМЕРОЙ (FPV)

Чтобы правильно рассчитать высоту подъема радиозондовой оболочки с подвешенной съемочной аппаратурой, необходимо знать: параметры камеры (размер матрицы и фокусное расстояние объектива); исходные данные (размеры снимаемой области, высота полета).

Необходимы и формулы, позволяющие вычислить требуемые значения на основе использования исходных данных. Физические размеры участка (в метрах) на изображении с конкретной камеры рассчитываются по нижеследующим формулам [6]

– горизонтальная сторона:

$$H = h * S / f; \quad (1)$$

– вертикальная сторона:

$$L = l * S / f; \quad (2)$$

где f – фокусное расстояние, мм;
 l – вертикальный размер матрицы, мм;
 L – вертикальный размер объекта (размер участка по вертикали), м;
 S – расстояние до объекта (высота пролета), м;
 h – горизонтальный размер матрицы, мм;
 H – горизонтальный размер объекта (размер участка по горизонтали), м.

В результате съемки камерой FPV возможно получение видео и фото изображений. В зависимости от расположения камеры (горизонтальная или вертикальная ориентация) необходимо выбирать l и h для сторон. Для горизонтального расположения («горизонтальные» снимки), длинная сторона фотографии перпендикулярна направлению движения) l будет соответствовать короткой стороне, а h – длинной. В случае, когда снимки «вертикальные» (длинная сторона фотографии направлена по ходу движения) l соответствует длинной стороне, а h – короткой.

Рассмотрим пример расчета высоты подъема радиозондовой оболочки с камерой (FPV).

Необходимо вычислить параметры высоты подъема оболочки для проведения видеосъемки на основе исходных данных (табл. 2).

Таблица 2

Параметры типовой камеры (FPV)

Параметр	Значение
Размер матрицы	2/3" (4:3)
Физические размеры матрицы ($h \times l$), мм	8,8 мм x 6,6
Фокусное расстояние объектива (f), мм	2,1

Расчет физических размеров участка наблюдения с учетом параметров камеры и объектива при подъеме оболочки на высоту 100 м выполняется следующим образом:

$$H = 8,8 \text{ мм} * 100000 \text{ мм} / 2,1 \text{ мм} = 419047,6 \text{ мм} = 419 \text{ м},$$

$$L = 6,6 \text{ мм} * 100000 \text{ мм} / 2,1 \text{ мм} = 314285,7 \text{ мм} = 314 \text{ м}.$$

Большинство камер типа FPV [7] рассчитано на высоту подъема БПЛА до высоты 500 м. Таким образом, физический размер участка наблюдения с учетом параметров камеры и объектива при подъеме оболочки на высоту 500 м составит:

$$H = 8,8 \text{ мм} * 500000 \text{ мм} / 2,1 \text{ мм} = 2095238 \text{ мм} = 2095,238 \text{ м} = 2,1 \text{ км},$$

$$L = 6,6 \text{ мм} * 500000 \text{ мм} / 2,1 \text{ мм} = 1571429 \text{ мм} = 1571,429 \text{ м} = 1,6 \text{ км}.$$

Из расчетов следует, что типовой БпЛА гражданского назначения способен в режиме зависания наблюдать территорию размером 2,1 на 1,6 км, т. е. площадь размером 3,36 км². Но, установленная на БпЛА камера, помимо ограничений по высоте подъема, устанавливаемых программно в прошивке БпЛА, будет иметь ограничения по времени работы аккумулятора, составляющие ориентировочно 30–40 мин. Соответственно при установке камеры на подвес радиозондовой оболочки можно получить преимущество в виде отсутствия ограничения по высоте подъема камеры, а также преимущество в виде возможности установки дополнительных или более мощных аккумуляторных батарей общим весом до 2–3 кг, что может увеличить продолжительность работы камеры в несколько раз.

При увеличении высоты подъема камер FPV при помощи носителя (радиозондовой метеорологической оболочки) до высоты 1000 м можно увеличить физический размер участка наблюдения с учетом параметров камеры и объектива до следующих значений:

$$H = 8,8 \text{ мм} * 1000000 \text{ мм} / 2,1 \text{ мм} = 4190476 \text{ мм} = 4190,476 \text{ м} = 4,2 \text{ км},$$

$$L = 6,6 \text{ мм} * 1000000 \text{ мм} / 2,1 \text{ мм} = 3142857 \text{ мм} = 3142,85,7 \text{ м} = 3,1 \text{ км}.$$

При таком увеличении высоты подъема камеры FPV возможно наблюдать территорию размером 4,2 на 3,1 км, т. е. площадь размером 13,02 км², что почти в 4 раза больше, чем в первом случае.

Возможны различные варианты снаряжения и применения оболочки. Например, можно использовать шнур требуемой длины и ограничить подъем оболочки с камерой на высоту, определяемую длиной шнура. В данном варианте оболочка и камера фиксируются в определенной точке пространства, и производится наблюдение за местностью в стационарном варианте на заданной оператором высоте, причем продолжительность полета оболочки с камерой может составить от 3–4 ч без подкачки оболочки до 10–12 ч с подкачкой газом (путем опускания оболочки при помощи троса и повторной подкачки газом из баллона комплекса). Возможна вариация и с сетевой установкой камер наблюдения на радиозондовых оболочках, приводящей к увеличению высоты подъема оболочки с камерой до высот, определяемых с учетом данных о длине и весе фиксирующего шнура, разрешающей способности применяемой камеры и решаемой ею задачи. Второй вариант возможен с выпуском оболочки с установленной камерой в свободный полет (одноразовый вариант применения) по направлению ветра. В данном варианте оболочка с камерой способна подняться на высоту до 30–40 км и передавать информацию с камеры до 3–4 ч, перемещаясь на расстояние до 150 км, но с ограничениями, связанными с возможностью передачи видеoinформации от видеокамеры по каналам связи с оператором.

ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОЗОНДОВЫХ ОБОЛОЧЕК С ЦИФРОВОЙ НЕМЕТРИЧЕСКОЙ КАМЕРОЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИНФОРМАЦИИ

При применении оболочек № 100 и 150 с максимальной подъемной массой полезной нагрузки 2–2,5 кг (см. табл. 1) представляется возможным дополнительное использование цифровых неметрических камер среднего разрешения (снимки которых не являются источником измерительной информации) для получения геопространственной информации (ГПИ) об участках местности с объектами контроля. Данная информация может быть использована для оперативного исправления и обновления картографической информации о районах производства аэросъемки, уточнения параметров (геометрических, функциональных и координатных) объектов контроля, а также в качестве дополнительной информации для подготовки исходных данных. К видам такой ГПИ, создаваемой по результатам аэросъемки, можно отнести аэроснимки местности с координатной сеткой, фотосхемы, фотопланы и фотокарты [8]. Так же для решения вышеперечисленных задач широко используются цифровые модели местности (ЦММ) и цифровые модели рельефа (ЦМР), которые в настоящее время уже воз-

можно формировать на базе оперативно обновляемых данных, получаемых посредством аэрофотосъемки с цифровых неметрических камер, устанавливаемых на различные летательные аппараты (самолеты, дельтапланы, аэростаты, БПЛА и т. д.) (рис. 3).



Рис. 3. Цифровая модель местности, разработанная на основе аэрофотосъемочных данных, полученных цифровой неметрической камерой среднего разрешения

Получение такой информации совместно с данными, поступившими от камеры, позволит также более точно привязывать объекты контроля, обнаруженные и зафиксированные данной камерой при ведении видеонаблюдения и видеосъемки с горизонтальной или вертикальной ориентацией оптической оси (плановой и перспективной съемки).

В качестве преимуществ использования цифровых неметрических камер можно выделить их малые массо-габаритные характеристики (до 0,2–0,5 кг), относительно невысокую стоимость и возможность разрабатывать ГПИ по результатам аэрофотосъемки в кратчайшие сроки, благодаря развитию фотограмметрических технологий и возможностям вычислительных средств обработки.

С учетом типов разрабатываемых фотодокументов и перечня решаемых с их помощью задач, к ГПИ предъявляются особые требования к точности определения по ним координат (ΔX , ΔY , ΔZ) объектов и масштаб ($1/m$) разрабатываемых цифровых документов. В зависимости от параметров самой цифровой неметрической камеры и высоты производства полета определяются также захват на местности, и, соответственно, ширина района аэрофотосъемки (L).

ПАРАМЕТРЫ АЭРОСЪЕМКИ ЦИФРОВОЙ КАМЕРОЙ С РАДИОЗОНДОВОЙ ОБОЛОЧКИ С ЦЕЛЮ ПОЛУЧЕНИЯ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИНФОРМАЦИИ

Для получения ГПИ с использованием радиозондовой оболочки в случае ее невозврата целесообразно использовать цифровые камеры среднего разрешения ценовой доступности. В табл. 3 приведены типовые тактико-технические характеристики (ТТХ) такой камеры.

Таблица 3

Параметры типовой цифровой неметрической камеры

Параметр	Значение
Размер матрицы, пикс.	6000 x 4000
Физические размеры матрицы ($h \times l$), мм	23,5 x 15,6
Фокусное расстояние объектива (f), мм	20, 35
Угол захвата камеры, град.	60 x 43

Для создания ГПИ применяется, как правило, площадная аэросъемка, однако в случае применения радиозондовой оболочки такая возможность отсутствует, поэтому будет применяться линейная аэросъемка по маршруту полета (рис. 4). Это изменяет и увеличивает требования к результатам аэросъемки для фотограмметрической обработки цифровых снимков и получения фотодокументов с требуемой точностью.

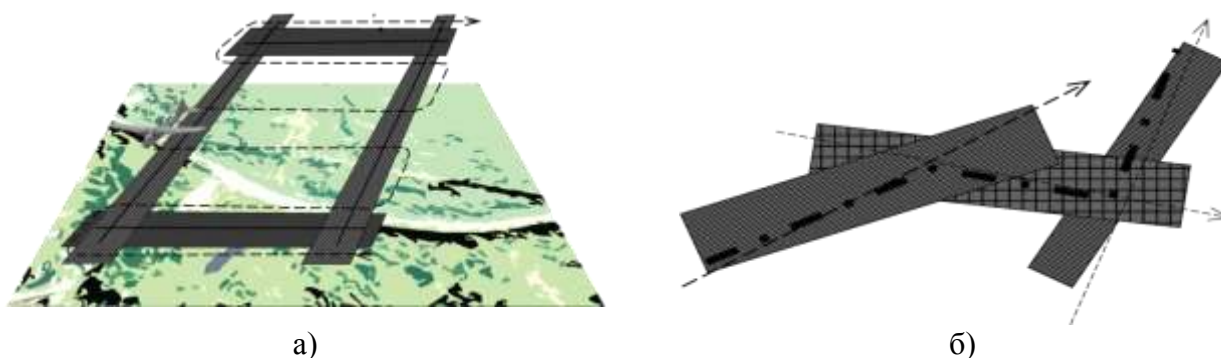


Рис. 4. Виды аэросъемки для получения ГПИ:
а – площадная аэросъемка; б – линейная аэросъемка

Так для стандартной съемки площадных объектов требования по продольному перекрытию по маршруту аэросъемки составляет 80% для цифровых снимков при использовании БПЛА [9]. В связи с нестабильностью положения оптической оси камеры (отклонением от планового положения) и необходимостью обеспечения тройного перекрытия на маршруте съемки целесообразно увеличивать требования к перекрытию до 90%. Данный параметр ограничивается возможностью аэросъемочной аппаратуры по частоте срабатывания затвора и времени накопления и формирования изображения. Однако из-за сравнительно малых скоростей полета зонда по сравнению с БПЛА самолетного типа (50–120 км/ч) данным ограничением можно пренебречь.

В зависимости от перечня решаемых задач разрабатываются требования к масштабу создаваемых фотодокументов. Данный параметр зависит от масштаба исходных аэросъемочных данных и напрямую зависит от пространственного разрешения снимков [9]. Требования к размерам пикселей на местности с учетом масштаба создаваемой ГПИ представлены в табл. 4.

Таблица 4

Рекомендуемый и максимально допустимый размеры пикселя на местности с учетом масштаба создаваемой ГПИ

Масштаб ГПИ	Максимально допустимый размер пикселя, м
1 : 1 000	0,14
1 : 2 000	0,22
1 : 5 000	0,42
1 : 10 000	0,60

Пространственное разрешение (максимально допустимый размер пикселя на местности) ΔL зависит от высоты производства аэросъемки и ТТХ фотоаппаратуры и вычисляется по формуле [10]

$$\Delta L = \frac{2 \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\Phi_y}{2}\right) \cdot H}{n_y}, \quad (3)$$

где n_y – размер матрицы фотоприемного устройства (ФПУ), мм;
 φ_y – угол захвата аэрофотографической камеры, град.;
 H – высота производства аэросъемки, м.

Еще одним параметром, определяемым при планировании и производстве аэросъемки, является захват на местности (ширина района аэросъемки) L , рассчитываемый по формуле

$$L = 2 \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\varphi_y}{2} \right) \cdot H. \quad (4)$$

При стандартной комплектации цифровой неметрической камеры для аэросъемки применяются широкоугольные короткофокусные объективы с фокусным расстоянием 20–35 мм. При таких параметрах ширина полосы захвата приблизительно равна высоте аэросъемки.

Проведя анализ результатов расчета (табл. 5), можно сделать вывод, что при достаточно устойчивом движении носителя (радиозондовой оболочки) возможны получение аэросъемочных данных и разработка на их основе детальных фотодокументов о местности для решения вышеперечисленных задач.

Таблица 5

Результаты расчета параметров аэросъемки цифровой неметрической камерой

H , м	L , м	ΔL , м	l/m
500	450	0,11	1 : 1 000
700	630	0,16	1 : 2 000
900	810	0,20	
1100	990	0,25	1 : 5 000
1300	1170	0,30	
1500	1350	0,34	
1700	1530	0,38	
1900	1710	0,43	1 : 10 000
2100	1890	0,47	
2300	2067	0,52	
2500	2250	0,56	

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрена возможность применения радиозондовых оболочек для подъема в атмосферу на требуемую высоту камеры (FPV) в целях наблюдения подстилающей поверхности и цифровой неметрической камеры для получения ГПИ. Показано, что данный способ может существенно расширить возможности применения камер (FPV) БпЛА, в частности, по высоте подъема, площади, глубине наблюдаемой поверхности, продолжительности работы полезной нагрузки, а также дает возможность вторичного использования исправных камер (FPV), снятых с разбитых (поврежденных) БпЛА.

Разработаны следующие рекомендации по применению радиозондовых оболочек и подбору для них камеры (FPV) и цифровой неметрической камеры:

– для камеры FPV использовать объектив с большим фокусным расстоянием (расстояние различения объекта в метрах соответствует фокусному расстоянию в миллиметрах, т. е. для объектива с $f = 8$ мм можно успешно проводить съемку с расстояния не менее чем 8 м). Чем больше фокусное расстояние объектива, тем большее приближение оно дает, но одновременно значительно снижается поле зрения камеры (угол раскрытия объектива);

– увеличить высоту подъема при использовании камеры FPV. При этом необходимо принимать в расчет параметры объектива, так как при небольшом фокусном расстоянии и при слишком большой высоте подъема не удастся получить детализированное изображение;

– для получения ГПИ по результатам аэросъемки цифровыми неметрическими камерами при выборе высоты необходимо учитывать масштаб получаемой ГПИ для решения определенного перечня задач;

– при формировании требований к цифровым неметрическим камерам для аэросъемки учитывать зависимость параметров получаемой ГПИ от ТТХ используемых камер.

Существенным достоинством применения в качестве носителя для камер FPV радиозондовых оболочек является их невысокая стоимость, наличие на снабжении в метеорологических подразделениях технических средств для их хранения, обслуживания и запуска, а также возможность запуска и подъема оболочки с камерой в воздух для получения информации вне зоны досягаемости стрелкового оружия противника.

Список используемых источников

1. Вооруженные Силы России в Сирии : Специальная операция. Вооружение и военная техника : научно-популярный труд / Министерство обороны РФ. – М. : АО «Красная Звезда», 2019. – 384 с.
2. Страницы истории отечественного воздухоплавания / Ю. О. Дружинин [и др.]. – М. : Русавиа, 2013. – 512 с.
3. Почему США не смогли сбить китайский зонд. – URL: <https://www.kp.ru/daily/27461.5/4716580/https://www.kp.ru/daily/27461.5/4716580/> (дата обращения: 22.02.2023).
4. Зачем Россия запускает на Украину воздушные шары с уголковыми отражателями. – URL: <https://topcor.ru/32155-zachem-rossija-zapuskayet-na-ukrainu-vozdushnye-shary-s-ugolkovymi-otrazhateljami.html> (дата обращения: 22.02.2023).
5. Устройство и эксплуатация радиопеленгационного метеорологического комплекса РПМК-1 : учеб. пособие / Г. В. Рудианов [и др.]. – СПб. : РГГМУ, 2012. – 168 с.
6. *Шабатов Е. И., Дудин Е. А.* Теория оптико-электронных систем и сигналов : учеб. пособие. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2016. – 223 с.
7. Обзор RunCam Eagle 2 Pro. – URL: <http://quad-copter.ru/runcam-eagle-2-pro.html> (дата обращения: 22.02.2023).
8. Руководство по фототопографическим работам при топогеодезическом обеспечении войск. – М. : РИО ВТС, 1983. – Ч. 3: Создание оригиналов специальных карт и фотодокументов о местности (РФР-3). – 94 с.
9. Руководство по цифровой аэросъемке в картографических целях (с беспилотных летательных аппаратов). – М. : ВТУ ГШ, 2020. – 105 с.
10. *Никульшин Б. Ю., Волков В. В., Кобзарева Ж. С.* Обоснование параметров аэросъемки беспилотным летательным аппаратом для оперативного обновления геопространственной информации на потенциально опасные объекты // Вопросы оборонной техники. Сер. 16 : Технические средства противодействия терроризму. – 2022. – № 9-10(171-172). – С. 58–64.

Д. Н. Бирюков,
доктор технических наук, профессор;
А. С. Дудкин,
кандидат технических наук;
И. А. Шестаков

ПОДХОД К ПОВЫШЕНИЮ ОБЪЯСНИМОСТИ И ИНТЕРПРЕТИРУЕМОСТИ РЕШЕНИЙ, ПРИНИМАЕМЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ

Обозначена необходимость повышения доверия к решениям, порождаемым системами искусственного интеллекта. Предложен подход к построению интеллектуальной системы, позволяющей интерпретировать решения, принимаемые ею. В основу рассматриваемого подхода построения интеллектуальной системы положена идея объединения нейросетевой и онтологической обработки поступающих на вход данных.

Ключевые слова: интеллектуальная система, искусственный интеллект, нейронные сети, глубокое обучение, «черный ящик», объяснимость, интерпретируемость, онтология.

ВВЕДЕНИЕ

В открытом письме [1] Илона Маска, Стива Возняка, Йошуа Бенжио, Юваля Ной Харари и т. д., опубликованном 29 марта 2023 г., содержится призыв ко «всем лабораториям искусственного интеллекта немедленно приостановить, по крайней мере, на 6 месяцев, подготовку систем искусственного интеллекта (ИИ), более мощных, чем GPT-4». В письме сказано, что системы искусственного интеллекта (СИИ) с интеллектом, конкурирующим с человеком, могут представлять серьезные риски для общества и человечества. Как указано в широко одобренных «Принципах ИИ» [2], сильный ИИ может представлять собой глубокое изменение в истории жизни на Земле, и его развитие следует планировать и управлять им с соответствующей осторожностью. К сожалению, такого планирования и управления не происходит, хотя в последние месяцы лаборатории ИИ оказались втянутыми в бесконтрольную гонку за разработкой и внедрением все более мощных интеллектуальных систем (ИС), которые никто – даже их создатели – не может понять, предсказать или надежно контролировать.

Лаборатории ИИ и независимые эксперты должны использовать предлагаемую в письме шестимесячную паузу для совместной разработки и внедрения набора общих протоколов безопасности для проектирования и разработки сильного ИИ, которые должны быть тщательно проверены и контролироваться независимыми внешними экспертами. Эти протоколы должны гарантировать, что системы, придерживающиеся их, вне всяких разумных сомнений, безопасны. Это не означает паузу в разработке ИИ в целом, а предполагает прекращение опасной гонки в разработке все более крупных моделей «черного ящика» (ЧЯ) с новыми возможностями, результаты которых являются непредсказуемыми.

В письме говорится, что исследования и разработки в области ИИ следует переориентировать на то, чтобы сделать сегодняшние мощные, современные системы более точными, безопасными, интерпретируемыми, прозрачными, надежными, согласованными, лояльными и заслуживающими доверия.

Элиезер Шломо Юдковский – американский специалист по ИИ, исследующий проблемы технологической сингулярности и выступающий за создание дружественного ИИ, в статье журналу Time [3] еще более категоричен в вопросе создания сильного ИИ на данном этапе: «Прогресс в возможностях ИИ значительно, намного опережает прогресс в настройке ИИ

или даже прогресс в понимании того, что, черт возьми, происходит внутри этих систем. Если мы действительно сделаем это, мы все умрем».

Как можно заметить, вопрос объяснимости и интерпретируемости [1, 3] решений, формируемых ИИ, а также порядка их получения, все громче звучит уже не только в кругах исследователей, но и со страниц мировых изданий. И этому действительно есть причина. На настоящем этапе развития основным методом обучения моделей ИИ является ЧЯ (см. ИИ от Alpha Zero, ChatGPT, GPT-3, GPT-4 и др.), так как такие модели показывают более высокую эффективность, чем модели интерпретируемые. Но понять ЧЯ весьма затруднительно, что в итоге приводит к отсутствию полного доверия к решениям, предлагаемым ИИ, с одной стороны, и к возможному осуществлению трудно выявляемых умышленных воздействий со стороны нарушителей на модели глубокого машинного обучения – с другой. На примере выше сказанного, видится целесообразным проектирование и разработка комплекса моделей и методов, способствующих повышению объяснимости и интерпретируемости решений, принимаемых ИС с реализованными в них механизмами глубокого обучения.

ПРИМЕРЫ АТАК НА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ, ПОСТРОЕННЫЕ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Прежде чем перейти к формированию частных предложений по реализации возможных путей, направленных на повышение объяснимости и интерпретируемости решений, принимаемых ИИ, предлагается рассмотреть существующую проблему безопасности алгоритмов машинного обучения. Рассмотрим данную проблему на примере решения задачи классификации. Для этого обозначим пару понятий:

- adversarial-пример – это входной вектор, вызывающий получение неправильного результата алгоритмом машинного обучения;
- adversarial-атака – это набор действий, целью которого является создание adversarial-примера.

Задачу классификации можно рассмотреть с геометрической точки зрения. В общем, в ходе решения данной задачи, необходимо разделить пространство таким образом, чтобы при предъявлении нового экземпляра его можно было соотнести с «правильным» классом объектов. Если бы была доступна генеральная совокупность, то гиперплоскость, разделяющую классы, можно было бы провести достаточно точно, при условии, что классы не пересекаются. Однако в реальности генеральная совокупность обычно неизвестна, поэтому на практике применяют алгоритмы машинного обучения, чтобы на основе имеющихся данных с максимальной точностью приблизить гиперплоскость к «идеальной». Поскольку идеальную гиперплоскость построить не получается, то приходится иметь дело с определенным «зазором», попадая в который объекты классифицируются неверно. Зная это, нарушитель может пытаться изменить adversarial-пример таким образом, чтобы объект попал если и не в другой класс, то в этот «зазор».

Рассмотрим далее некоторые примеры подобных adversarial-атак.

В статье [4] описан эксперимент, в ходе которого удалось осуществить атаку на нейронную сеть, распознающую лицо на фотографии (рис. 1,а). Атака осуществлялась путем добавления определенного «шума». При этом человек не замечает изменений, а нейросеть перестает распознавать представленный объект.

В работе [5] приведено описание adversarial-атаки, направленной на то, чтобы «заставить» нейросеть осуществлять неверную классификацию. При этом показано, что объект, подлежащий анализу, не обязательно должен быть похож на объекты, на которых проводилось обучение сети (рис. 1,б).

Так же хорошо известен среди специалистов в области обучения нейронных сетей пример, в ходе которого панда распознается как гиббон с вероятностью более 99% [6] (рис. 1,в).

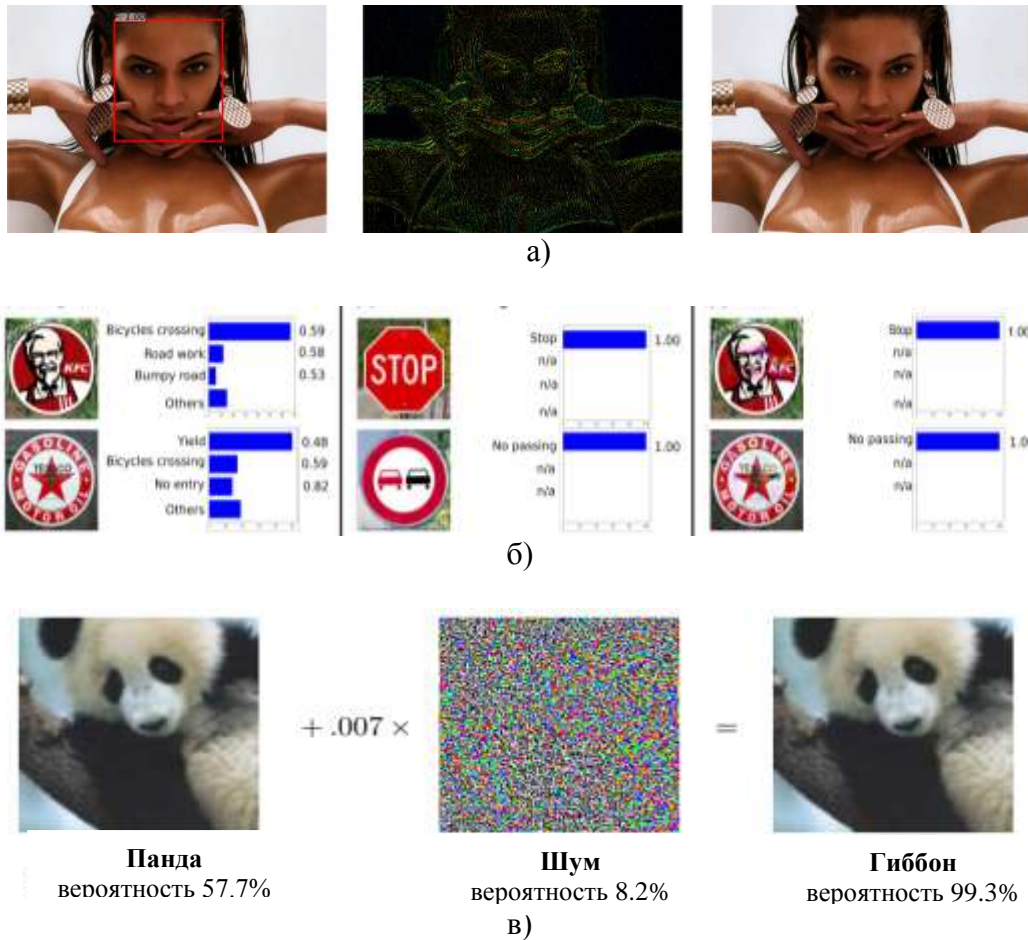


Рис. 1. Примеры adversarial-атак на ИС распознавания, построенные на основе нейронных сетей

Оказывается, порой достаточно изменить всего один пиксель для того, чтобы осуществить adversarial-атаку на алгоритм распознавания [7].

Существует достаточно большое количество атак, направленных на алгоритмы машинного обучения, позволяющих сделать вывод о том, что слепо верить системам машинного обучения можно не всегда. Необходимо понимать, как и почему ИС принимает то или иное решение, а также хорошо бы иметь возможность верифицировать принятое решение.

ОБЪЯСНИМОСТЬ И ИНТЕРПРЕТИРУЕМОСТЬ – ВАЖНЫЕ АСПЕКТЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ

Вопросами объяснения и интерпретации решений, принимаемых ИС, основанными на нейронных сетях, исследователи заинтересовались сравнительно недавно. Поэтому единого мнения о том, что следует понимать под «объяснимостью» и «интерпретируемостью» пока нет, хотя работ, появляющихся в этом направлении, с каждым годом становится все больше. Недостаточно уметь объяснить порядок принятия решений, нужно иметь возможность делать это так, чтобы понял человек (лицо, принимающее решение – далее ЛПР). Вероятнее всего имеет смысл решать озвученную задачу с конца, а именно с рассмотрения вопросов относительно того, как донести человеку информацию о том, каким образом было получено то или иное решение. Предположим, что на данном этапе изучение понятия интерпретируемости, применительно к решениям, принимаемым ИС вида ЧЯ, имеет более широкую перспективу по сравнению с изучением понятия объяснимости. Например, допускается

сформировать огромный лог-файл в ходе работы ЧЯ, но понять его человек будет не в силах. Необходимо искать подходы для модификации ИС и их элементов [8] («Решателя задач», «Информационной среды» и «Интеллектуального интерфейса») таким образом, чтобы это способствовало пониманию инженерами по знаниям и ЛПР того, как и почему принимается то или иное решение ИС.

Рассмотрим понятие интерпретация применительно к ИС. Некоторые авторы [9] определяют интерпретацию как процесс перевода абстрактного понятия, такого как предсказанный класс, в форму, которую человек может понять. Другие считают [10, 11], что цель интерпретируемости заключается в описании внутренней работы системы на языке, понятном человеку. Математического определения интерпретируемости нет, но есть подходы для ее измерения [11]. В общем, интерпретируемость – это степень, с которой человек может понять причину решения [12].

Объектом интерпретации является объяснение. Таким образом, необходимо, чтобы ИС (ее надсистема или система-помощник) могла объяснить ход вывода принятого решения, а «хорошее» объяснение должно быть, как минимум, правильным и интерпретируемым. Существует пять негласных требований к объяснению систем глубокого обучения [13]: точность, понятность, достаточность, низкая ресурсоемкость и эффективность.

Поскольку каждое решение, принимаемое глубокими нейронными сетями, представляет собой сложную комбинацию тысяч нейронов и весов, взаимодействующих друг с другом, объяснение часто является трудной задачей. Поэтому возникает острая потребность иметь возможность задавать системе дополнительные вопросы, чтобы понять причины того, почему система приняла конкретное решение или сделала тот или иной прогноз [14].

ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ, ПОЗВОЛЯЮЩЕЙ ИНТЕРПРЕТИРОВАТЬ РЕШЕНИЯ, ПРИНИМАЕМЫЕ ЕЮ

Если взглянуть на примеры, представленные на рис. 1, то можно убедиться, что человек однозначно правильно распознает изображения. В связи с чем возникает вопрос, а стоит ли разбираться в результате чего допустила ошибку ИС, или лучше подойти к решению задачи, связанной с проектированием системы, которая сочетала бы, на сколько это возможно, плюсы глубоких нейронных сетей – с одной стороны, и могла бы представить понятный пользователю порядок принятия решения – с другой?

Человек воспринимает увиденное в рамках когнитивного процесса, в ходе которого он осуществляет следующие шаги:

- 1) получение информации через чувственные органы (сенсоры) или извлечение информации из долговременной памяти;
- 2) формирование (уточнение) образа предмета или явления, которое проявилось через восприятие реальности;
- 3) сравнение образа с концепцией (при необходимости - создание концепции путем определения образа и его именованя, а также выявление и определение его аспектов);
- 4) образование заключений на основе актуализированных концепций с созданием конечной концепции;
- 5) при необходимости возврат к шагу 2.

Для автоматизации подобного процесса в ИС необходимо иметь концептуальную модель предметной (или даже проблемной) области. Для ее построения можно применять различные формальные модели. Так, например, для описания сравнительно простых объектов и шаблонных процессов можно использовать возможности, предоставляемые фреймовыми моделями представления знаний. Однако если иметь дело с более сложными и изменяющимися объектами и многоэтапными, заранее неизвестными процессами, то более обосновано применять для представления фактов и знаний онтологические построения.

В общем случае под онтологией можно понимать формальное описание результатов концептуального моделирования предметной области, представленной в форме, воспринимаемой человеком и компьютерной системой [15]. Онтология состоит из примитивов представления знаний предметной области (определений основных понятий, таких как имена индивидуумов, классы, функции и другие сущности), а также различного рода семантических связей, поддерживаемых между ними.

Исходя из результатов проведенного анализа [16] можно предположить, что любой тип данных, используемый при онтологическом моделировании предметных областей, можно описать через частично упорядоченный свойством аппроксимации перечень: *объектов*, которые ему соответствуют; *свойств* этих объектов и функций (а для общего случая – *действий*), которые могут рассматриваемые объекты выполнять.

Основные концепты и роли (отображения между ними), используемые для построения базы знаний проектируемой ИС, можно представить в виде единой схемы, изображенной на рис. 2. Предложенная модель представления знаний может быть использована для организации семантической памяти (в которой будет храниться онтология) Гиромата [17], применяемого для интерпретации решений принимаемых ИС, решающей задачи по распознаванию объектов и процессов наблюдаемой предметной области.

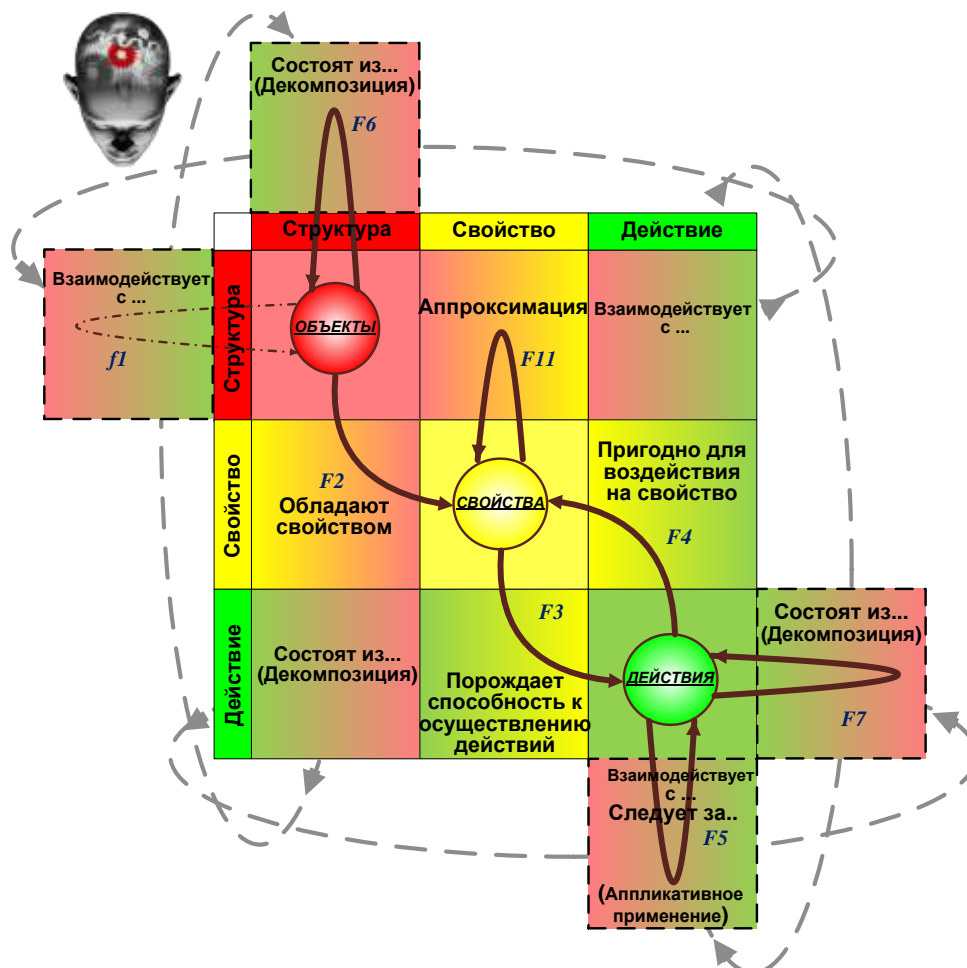


Рис. 2. Основные концепты и роли, которые предлагается использовать для построения базы знаний (семантическая память) интеллектуальной системы

Предложенный подход к формализации фактов и знаний [8, 16, 17] может быть положен в основу системы, способной воспринимать предъявляемые ей объекты и явления объективной реальности фрагментарно и далее – производить семантический анализ последовательности

интерпретируемых ею понятий, однозначно соотносимых с концептами, хранящимися в онтологии.

Для фрагментарного восприятия предъявляемых на вход данных, предлагается разработать систему сенсоров, в основе работы которой и будут лежать механизмы распознавания, реализованные через применение глубоких нейронных сетей (рис. 3).

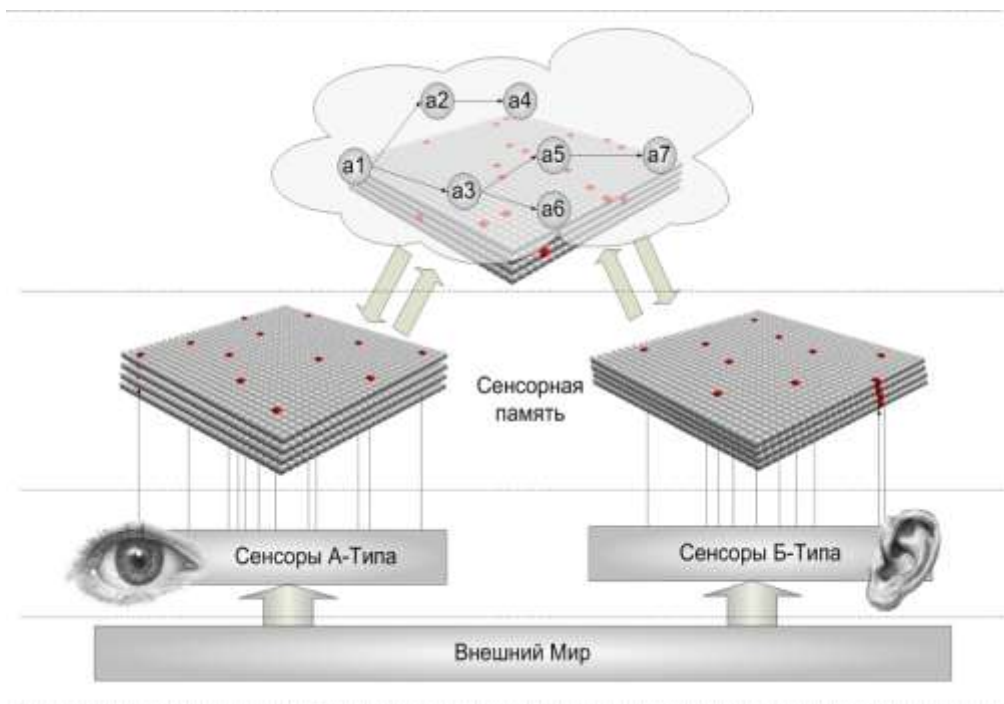


Рис. 3. Возможная реализация получения информации интеллектуальной системой через чувственные органы (сенсоры)

Очевидно, что обучить предлагаемую систему будет сложнее, однако это может быть вполне приемлемым при создании ИС, применяемых для решения критически важных задач, тогда понимание решения, предлагаемого ИС, выходит на передний план.

Для реализации предложенной концептуальной модели будут необходимы значительные человеческие и машинные ресурсы. Необходимо будет создать многомерные структуры данных и разработать эффективные алгоритмы доступа к ним для манипуляции ими и их преобразования. Кроме того, необходимо решить задачу по получению и систематизации знаний. Базой для структурирования знаний могут быть сцены и сценарии с ярко выраженной целевой направленностью. Таким образом, построенная онтология позволит хранить описания возможных виртуальных миров, в которых могут отображаться объекты, явления и процессы объективного мира.

Человек, решая информационные задачи, неосознанно применяет комбинированный подход, который включает мыслительные операции структурно-логического типа и операции на основе использования сложившихся стереотипов. При наличии устойчивого стереотипа возможно моментально преобразовать входную информацию в результат на уровне понятия. Стереотипический подход, который является естественным механизмом для человека, отличается высокой оперативностью и предполагает предварительное обучение. Однако, чем сложнее фрагмент реальности, относительно которого строится стереотип, тем дольше требуется обучение, и тем менее надежна реакция на сложившуюся ситуацию. Также окружающий мир постоянно изменяется и наработанные стереотипы теряют актуальность. Но, как видится, применение онтологического подхода для описания стереотипов (шаблонов), позволит, с одной стороны, гибко и динамично готовить систему к восприятию возможных

фрагментов реальности, а с другой – даст возможность интерпретации решений, принимаемых ею, на языке, понятном человеку. Языком, отвечающим требованиям сегодняшнего дня, очевидно, может выступать естественный или близкий к нему язык, например язык первого порядка. Это связано с тем, что аналитик должен не только получать результаты от интеллектуальной системы, но и являться ее важной частью, которая органично взаимодействует с системой. В идеале, механизмы функционирования всей системы, состоящей из ИС и лица, принимающего решения, должны быть приближены к механизмам информационной деятельности человека.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наблюдаемая популярность СИИ, основанных на применении нейронных сетей и глубокого обучения, уже вызывает озабоченность, так как никто – даже создатели – не могут их объяснить, предсказать или надежно контролировать. Очевидна необходимость проведения исследований, направленных на повышение доверия к решениям, порождаемым СИИ. Добиться искомого доверия можно через разработку инструментов, повышающих объяснимость и интерпретируемость хода принятия решений и полученных выводов. Данная задача не является тривиальной, так как большинство применяемых на сегодняшний день интеллектуальных систем основаны на применении модели типа ЧЯ. Вместе с тем отказаться от использования СИИ становится все сложнее, а поэтому необходимо искать компромиссные решения. Примером такого решения может стать разработка и применение ИС, способных сочетать онтологическое моделирование виртуальных миров с применением концептов и связей между ними, вполне воспринимаемых человеком, а также комплекса нейросетевых распознавателей, призванных выделять из входных данных определенные фрагменты наблюдаемой действительности, которые могут быть поименованы и соотнесены с понятиями, представленными в онтологии. Данный подход должен позволить реализовать такую информационную деятельность, в ходе которой лицо, принимающее решение, сможет понять, почему ИС пришла к тому или иному выводу.

Список используемых источников

1. Pause Giant AI Experiments: An Open Letter. – URL: <https://futureoflife.org/open-letter/pause-giant-ai-experiments/> (дата обращения: 30.03.2023).
2. Ai Principles. – URL: <https://futureoflife.org/open-letter/ai-principles/> (дата обращения: 30.03.2023).
3. Pausing AI Developments Isn't Enough. We Need to Shut it All Down. – URL: <https://time.com/6266923/ai-eliezer-yudkowsky-open-letter-not-enough/> (дата обращения: 30.03.2023).
4. Adversarial Attacks on Face Detectors using Neural Net based Constrained Optimization. – URL: <https://arxiv.org/pdf/1805.12302.pdf> (дата обращения: 31.03.2023).
5. (Extended Abstract) Rogue Signs: Deceiving Traffic Sign Recognition with Malicious Ads and Logos. – URL: <https://arxiv.org/pdf/1801.02780.pdf> (дата обращения: 31.03.2023).
6. Explaining and harnessing adversarial examples. – URL: <https://arxiv.org/pdf/1412.6572.pdf> (дата обращения: 31.03.2023).
7. One Pixel Attack for Fooling Deep Neural Networks. – URL: <https://arxiv.org/pdf/1710.08864.pdf> (дата обращения: 31.03.2023).
8. Бирюков Д. Н., Ломако А. Г., Ростовцев Ю. Г. Облик антиципирующих систем предотвращения рисков реализации киберугроз // Труды СПИИРАН. – 2015. – № 2(39). – С. 5–25.
9. Montavon G., Samek W., Müller K.-R. Methods for interpreting and understanding deep neural networks // Digital Signal Processing. – 2018. – Vol. 73. – P. 1–15. – DOI: 10.1016/j.dsp.2017.10.011.

10. Explaining explanations: An approach to evaluating interpretability of machine learning / L. H. Gilpin [et al.]. – URL: <https://arxiv.org/abs/1806.00069v3> (дата обращения: 05.05.23).
11. *Doshi-Velez F., Kim B.* Towards a rigorous science of interpretable machine learning. – URL: <https://arxiv.org/abs/1702.08608v2> (дата обращения: 05.05.23).
12. *Miller T.* Explanation in artificial intelligence: Insight from the social sciences // *Artificial Intelligence*. – 2019. – Vol. 267. – P. 1–38. – DOI: 10.1016/j.artint.2018.07.007.
13. *Hansen L. K., Rieger L.* Interpretability in intelligent systems – A new concept? // *Explainable AI: Interpreting, Explaining and Visualizing Deep Learning, LNCS*. – 2019. – Vol. 11700. – P. 41–49.
14. *Miller T.* Explanation in artificial intelligence: Insight from the social sciences // *Artificial Intelligence*. – 2019. – Vol. 267. – P. 1–38. – DOI: 10.1016/j.artint.2018.07.007.
15. Систематизация мультимедийного контента электронного курса на основе онтологии предметной области. – URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=11480> (дата обращения: 31.03.2023).
16. *Бирюков Д. Н., Ломако А. Г.* Денотационная семантика контекстов знаний при онтологическом моделировании предметных областей конфликта // *Труды СПИИРАН*. – 2015. – № 5(42). – С. 155–179.
17. *Бирюков Д. Н., Ломако А. Г.* Подход к построению ИБ-систем, способных синтезировать сценарии упреждающего поведения в информационном конфликте // *INSIDE*. – 2014. – № 6. – С. 42–50.

Д. Н. Бирюков*,
доктор технических наук, профессор;

П. В. Тимашов*,
кандидат технических наук;

В. И. Чернышов**,
кандидат технических наук

* Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург.

** НИИ информационной безопасности ВАГШ ВС РФ, г. Москва.

МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ СОСТОЯНИЙ КОНФИГУРАЦИИ ЭЛЕКТРОННОГО ДОКУМЕНТООБОРОТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АССОЦИАТИВНОЙ РЕСУРСНОЙ СЕТИ

Предложен метод идентификации потенциально опасных состояний конфигурации электронного документооборота с использованием ассоциативной ресурсной сети, позволяющий определить наиболее критичные элементы организационно-технической системы, которые могут быть выбраны внутренним нарушителем в качестве потенциальных объектов для воздействия и распространения вредоносного программного обеспечения с помощью электронных документов.

Ключевые слова: защита информации, вредоносное программное обеспечение, компьютерные атаки, информационная безопасность.

ВВЕДЕНИЕ

Мировая и отечественная статистика показывает, что наиболее уязвимые приложения – это офисные приложения. Большинство компьютерных атак, проводимых по всему миру, начинаются именно с распространения офисных файлов с вредоносным программным обеспечением (ВПО). В каждой организации существует определенный порядок обмена электронными документами. Не без оснований можно предположить, что нарушитель будет стараться внедрить вредоносный электронный документ определенного типа в те процессы, которые подразумевают большой обмен таким типом файлов. В данной статье рассматривается возможность определения предпочтений нарушителя при выборе процессов обмена документами, через которые потенциально возможно осуществить воздействия. Предлагаемый в статье метод состоит из семи последовательных этапов.

ЭКСПЕРТНОЕ РАНЖИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПО ВАЖНОСТИ

На **первом этапе** осуществляется экспертное ранжирование процессов по важности. Для ранжирования по важности необходимо определить приоритетность процессов, протекающих на объекте критической информационной инфраструктуры (ОКИИ). Чтобы оценить, какие процессы имеют более высокий приоритет, можно воспользоваться интегральным показателем «индекс приоритетности процессов». Ранжирование процессов по приоритетности происходит на основе квалиметрического подхода. Для определения балльных характеристик оценки критериев приоритетности процессов используется экспертный метод, учитывающий компетентность экспертов. Использование предложенных критериев и индекса приоритетности процессов помогает получить числовую интегральную оценку. Основным результатом определения приоритетных процессов должен стать рейтинг процессов по важности (вкладу в выполнение задачи) [1].

На **втором этапе** следует определить вовлеченность элементов КИИ в значимые процессы и осуществить их ранжирование.

Сложные информационно-технические системы включают в себя несколько программных и технических компонентов, которые относятся к разным элементам и используются в разных важных процессах. Каждый элемент имеет свои собственные уникальные свойства, параметры и состояния, которые относятся к разным смысловым категориям. На основе этого предлагается использовать две частные модели для обеспечения информационной безопасности: модель инфраструктуры системы и модель оценки риска реализации потенциальных угроз.

Предлагается создание инфраструктурной модели путем описания взаимодействия между элементами ОКИИ с помощью многоуровневых комплексных сетей. В данном подходе используются бинарные взаимодействия элементов в различных тематических слоях, где стволы являются акторами, связующими эти слои, а узлы крепятся к стволам. При объединении всех слоев стволы превращаются в узлы, а многоуровневая сеть становится комплексной сетью, описывающейся мультиграфом с кратными ребрами (рис. 1). Такой подход к описанию структурной взаимосвязи между элементами системы позволяет моделировать взаимодействие множества узлов в нескольких тематических слоях, которые не пересекаются, и учитывать множество разнообразных связей (ребер) между одной и той же парой вершин (узлов).

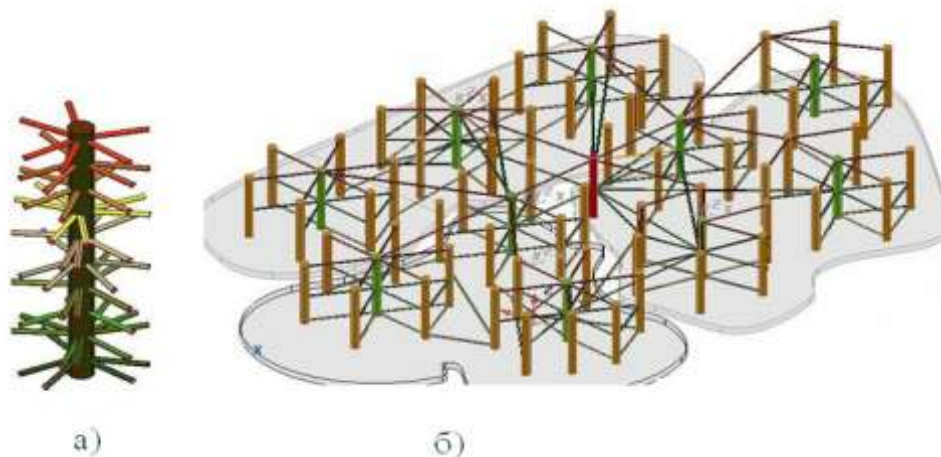


Рис. 1. Многоуровневая сеть:

*а – определение узлов в многоуровневой сети и их участие в процессах;
б – определение взаимодействия между узлами в различных тематических слоях*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАИБОЛЕЕ ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНЫХ ДЛЯ НАРУШИТЕЛЯ ПРОЦЕССОВ ОБМЕНА ЭЛЕКТРОННЫМИ ДОКУМЕНТАМИ

На **третьем этапе** необходимо определить наиболее предпочтительные для нарушителя процессы обмена электронными документами. Для этого используем ассоциативную ресурсную сеть (АРС). В АРС Δ_{brt} – величина, на которую увеличивается яркость вершины при обращении к ней. Увеличение яркости узла brt , находящегося в вершине АРС, однозначно связанной с активируемым концептом, происходит при каждом обращении к концепту онтологии и зависит от типа обращения [2]. Рассмотрим основные характеристики АРС, к которым относятся:

Δr – величина, на которую увеличивается пропускная способность ребра, в случае передачи по нему данных [4],

$$\Delta r = THR \left(BRT(init), TL \left(l_{\langle tl, v[i], v[j], dir, cnt, r \rangle} \right), DL \left(l_{\langle tl, v[i], v[j], dir, cnt, r \rangle} \right) \right);$$

$k_{\langle v[i],v[j] \rangle}$ – коэффициент ослабления распространения ассоциативного сигнала по APC от $v[i]$ к $v[j]$,

$$k_{\langle v[i],v[j] \rangle} = \frac{RL(l_{\langle tl, v[i],v[j], dir, cnt, r \rangle})}{BV(v_{\langle i, tv, brt \rangle})} \times \frac{RL(l_{\langle tl, v[i],v[j], dir, cnt, r \rangle})}{Sum_r};$$

Sum_r – суммарная пропускная способность ребер, по которым должно осуществляться распространение данных от вершины $v[i]$.

Далее проводится адаптация выбора нарушителем процессов обмена электронными документами при эволюции электронного документооборота (на основе моделирования процедуры «забывания»).

Если

$$r_{sum}^{buf} \geq r_{MAX} \text{ или } brt_{sum}^{buf} \geq brt_{MAX},$$

где r_{sum}^{buf} – суммарная пропускная способность ребер, описывающих процесс;
 brt_{sum}^{buf} – суммарная «яркость» вершин, описывающих процесс;
 r_{max} – максимально допустимая суммарная пропускная способность ребер;
 brt_{max} – максимально допустимая суммарная яркость вершин;
 r_{sum} – суммарная пропускная способность ребер APC,

$$r_{sum} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N RL(l_{\langle tl, v[i],v[j], dir, cnt, r \rangle});$$

brt_{sum} – суммарная пропускная способность вершин APC,

$$brt_{sum} = \sum_{id=1}^N BV(v[id]),$$

то инициируется процедура забывания:

1) осуществляется пересчет «яркостей» всех вершин APC:

$$brt = \frac{BV(v[id])}{brt_{sum}} \times 10^{[\lg(brt_{sum})]^{-1}};$$

2) осуществляется пересчет пропускных способностей всех ребер APC [4]:

$$r = \frac{RL(l_{\langle tl, v[i],v[j], dir, cnt, r \rangle})}{r_{sum}} \times 10^{[\lg(r_{sum})]^{-1}}.$$

Исходя из приведенных формул, следует, что в случае, если за период между двумя последовательными перенормировками определенные концепты и роли, их связывающие, ни разу не затрагивались в ходе электронного документооборота, то пропускная способность ребер и яркость вершин APC, однозначно связанной с онтологией, уменьшается в 10 раз. Если обмен между концептами был скорее случайным, чем закономерным, сила ассоциации между такими концептами со временем станет исчезающе малой, но сама связь не исчезнет вовсе. Очевидно, что те концепты и связи (роли) между ними, которые все время подкрепляются, будут обладать наибольшими яркостями и пропускными способностями [2].

По итогам выполнения третьего этапа получаем нормированную APC $r' = Norm(r)$, что будет необходимо на пятом этапе.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ УСПЕШНОГО ВЫПОЛНЕНИЯ ДЕЙСТВИЙ НАРУШИТЕЛЕМ

На четвертом этапе определяется вероятность успешного выполнения действий нарушителем. В каждый момент времени права доступа нарушителя характеризуются вектором $Pa(t) = (pa_i)_{n \times 1}$. Элемент $pa_i(t)$ соответствует текущим правам нарушителя на объект $i \in N$. Номинация прав представлена в табл. 1. Численно права представлены двоичной записью. Права *Read* соответствуют последнему разряду двоичного числа, права *Write* – первому.

Таблица 1

Числовая нотация прав

Класс прав	Двоичное представление	Десятичное представление
None	00	0
R	01	1
W	10	2
WR	11	3

Действие называется легальным, если права нарушителя позволяют его выполнить. Вероятность выполнения такого действия всегда равна единице. Если в рамках текущих прав действие выполнить невозможно, но объект находится в уязвимой зоне, то нарушитель может попытаться выполнить действие нелегально.

Тогда вероятность выполнения действия вычисляется по формуле

$$P^{success} [i, pa_i, v_i] = \sqrt{\frac{v_i}{v^{max}} \times \frac{\max \{ pa_i; pa_{parent(i)} \} + 1}{pa^{max} + 1}},$$

где $i \in N$ – объект;
 pa_i – числовая нотация текущих прав нарушителя на объект;
 $pa_{parent(i)}$ – права объекта на родительский узел i ;
 pa^{max} – максимально допустимые в права (WR).

Уязвимость объекта $v_i \in [0, v^{max}]$. В данном методе $v^{max} = 10$, как в системе CVSS. На рис. 2 показано, как зависит вероятность выполнения нелегальных действий от уязвимости объекта и текущих прав.

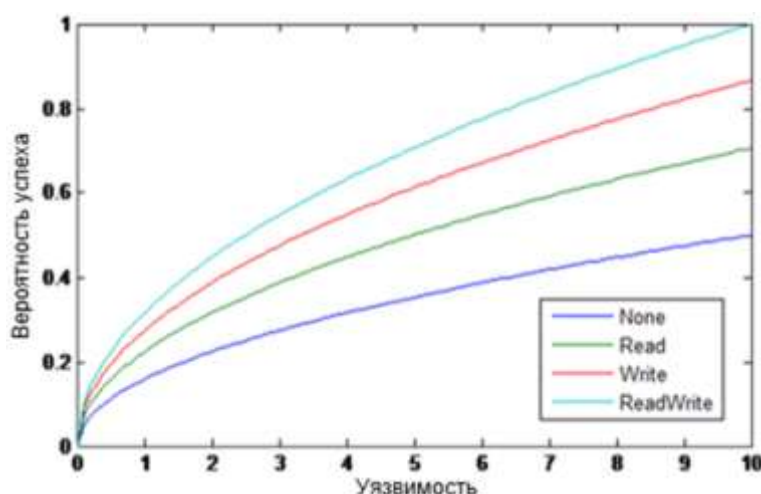


Рис. 2. Зависимость вероятности успеха нелегального действия от уязвимости объекта и текущих прав

В табл. 2 представлены действия нарушителя. Предполагается, что ему известны все характеристики системы: топология, уязвимости узлов и таблица прав.

Таблица 2

Действия нарушителя

Действие	Тип целевого объекта i	Требуемые права	Результат		Описание
			Состояние $S(t)$	Вектор прав $Pa(t)$	
Read	любой	R	$K_i=0$	–	Чтение данных, получение информации об узле или процессе
Write	любой	W	$U_i=0$	–	Изменение данных, параметров узла или процесса
Shutdown	любой	W	$D_i=0$	–	Остановка узла, процесса или удаление данных
SetPrivilegesR, SetRightsW, SetRightsRW, SetRightsNone	любой	W на родительский узел	$U_{parent(i)}=0$	$Pa_i(t)=\{R, W, RW, None\}$	Устанавливает для нарушителя новые права на объект
HijackRights	процесс или учетная запись	None	$U_i=0$	$Pa(t) = \max(Pa_i(t), M^{Pa_i})$	Получает права данного объекта

ПОСТРОЕНИЕ СЦЕНАРИЕВ РАЗВИТИЯ АТАКИ

На пятом этапе для построения сценария развития атаки необходимо определить точку вторжения/персону/роль (порядок обхода начальных точек), матрицу целевого состояния системы, начальные права нарушителя и рассчитать показатель предпочтительности $prf = r' * P^{success}$, где $prf \in [0,1]$. При построении сценариев развития атаки необходимо идентифицировать наиболее опасные состояния конфигурации. Уровень защищенности каждого объекта ОКИИ характеризуется тремя показателями: конфиденциальностью, целостностью и доступностью, каждый из которых может быть нарушен как отдельно, так и в комбинации с другими. В зависимости от объекта, нарушение этих показателей в разных комбинациях может по-разному влиять на оценку рискового потенциала. Так, например, для публичных данных нарушение конфиденциальности не приведет ни к каким последствиям, однако нарушение целостности может стать критичным; с другой стороны, потенциально возможны ситуации, в которых нарушение целостности данных не так критично, как нарушение их конфиденциальности. Сами объекты также могут иметь разную значимость и оказывать разное влияние на ОКИИ в целом. Решить, какие объекты и какие из показателей этих объектов наиболее важны в рамках данного ОКИИ, может только эксперт. Информационная безопасность ОКИИ в целом в каждый момент времени характеризуется бинарной матрицей $S(t)$ размера $n \times 3$:

$$S(t) = \begin{pmatrix} \kappa_1 & u_1 & \partial_1 \\ \kappa_2 & u_2 & \partial_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \kappa_n & u_n & \partial_n \end{pmatrix} (t),$$

где строка $s_i = (\kappa_i, u_i, \partial_i)$ представляет целевое состояние узла i с точки зрения его конфиденциальности ($\kappa \in \{0,1\}$), целостности ($u \in \{0,1\}$) и доступности ($\partial \in \{0,1\}$).

В работе моделируется наихудший вариант для объекта КИИ и будем полагать, что изменения, происходящие в защищенности объектов, носят необратимый характер: ни один нарушенный параметр не может восстановиться.

Далее сформируем возможные траектории изменения уровня информационной безопасности (УИБ). Назовем *атакованными* те хосты, на которые у нарушителя есть ненулевые права. Обозначим множество атакованных хостов как $N^{Inf}(t)$. Граф $G^{Inf}=(N^{Inf}, E^{Inf})$ содержит все сетевые связи между пораженными узлами, а также все связи вложения виртуальных машин. Точка вторжения ap всегда принадлежит G^{Inf} . Назовем *захваченными* те атакованные хосты, к которым в графе G^{Inf} существует путь из точки вторжения. Это хосты, с которых нарушитель расширяет свое присутствие в системе. Обозначим множество захваченных хостов как $N^A(t)$. Назовем *уязвимыми* те узлы системы, над которыми нарушитель может выполнять легальные или нелегальные действия. Узел становится уязвимым, если захвачен один из следующих узлов:

- 1) смежный хост (физический или виртуальный);
- 2) вложенная виртуальная машина;
- 3) родительский узел.

Получим дерево сценариев развития атаки в рамках выполнения процесса, предполагающего обмен электронными документами (рис. 3).

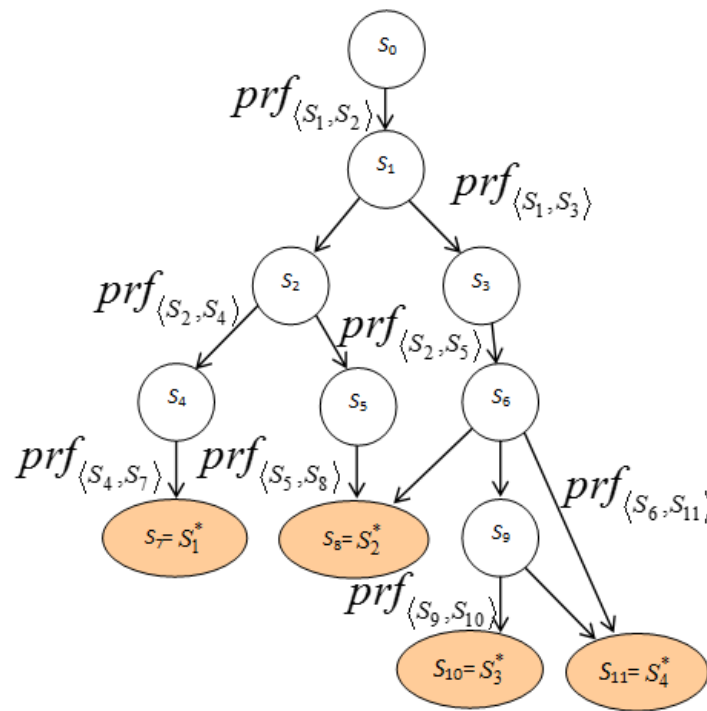


Рис. 3. Дерево сценариев развития атаки

Полученные сценарии (траектории движения документов) запишем в виде траектории изменения УИБ ОКИИ:

$$MASS_T = \left. \begin{array}{l} T1: S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow S_4 \rightarrow S_7; \\ T2: S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow S_5 \rightarrow S_8; \\ T3: S_1 \rightarrow S_3 \rightarrow S_6 \rightarrow S_8; \\ T4: S_1 \rightarrow S_3 \rightarrow S_6 \rightarrow S_9 \rightarrow S_{10}; \\ T5: S_1 \rightarrow S_3 \rightarrow S_6 \rightarrow S_9 \rightarrow S_{11}; \\ T6: S_1 \rightarrow S_3 \rightarrow S_6 \rightarrow S_{11}. \end{array} \right\}.$$

Для отдельно взятой (например, T_5) траектории уровень информационной безопасности ОКИИ может иметь вид:

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

ПОСТРОЕНИЕ ВЕКТОРА РИСКОВОГО ПОТЕНЦИАЛА ОКИИ

Шестой этап представляет собой этап построения вектора рискового потенциала ОКИИ, позволяющий произвести расчет потенциального ущерба при попадании ОКИИ в зону риска для ранжирования потенциально опасных состояний ЭДО. Оценка рискового потенциала ОКИИ задается в виде вектора-столбца $\vec{\gamma} = \langle \gamma_1, \dots, \gamma_r \rangle^T$ (верхний индекс «Т» обозначает операцию транспонирования), где каждая компонента описывает состояние одного из критериев, определенных экспертами, и принимает значения из набора {зеленый, желтый, красный} $\gamma \in \{\bullet, \bullet, \bullet\}$. Для ОКИИ задаются отображения, $f_1(S), \dots, f_r(S)$, которые каждой матрице S ставят в соответствие одно из n значений γ_r : $f_1(S) = \gamma_1, \dots, f_r(S)$. Наилучший вариант матрицы S имеет следующий вид:

$$S_i = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} \bullet \\ \bullet \\ \bullet \\ \dots \\ \bullet \\ \bullet \end{pmatrix}.$$

Максимальный рисковый потенциал рассчитывается по формуле

$$\sum_{i=1}^r f_i(S_0) \cdot e_i \langle \gamma_1, \dots, \gamma_r \rangle^T,$$

где S_0 – матрица из всех нулей;
 S_0 и S_1 – границы рискового потенциала;
 f_1, \dots, f_r – монотонны.

Требование монотонности означает, что большие нарушения в системе влекут за собой не меньшее значение индикаторов рискового потенциала.

Далее определяется попадание ОКИИ в зону риска путем наложения шаблонов с которыми поработали эксперты на матрицу S (рис. 4). Шаблон $pattern1_i$ – красная зона (входят самые критичные элементы), $pattern2_i$ – желтая зона, $pattern1_i \subset pattern2_i$.

1. Если в матрице все единицы, она переходит в зеленую область по всем критериям.
2. Накладываем на матрицу шаблон $pattern1_i$. Если в нем хоть один элемент равен нулю, по критерию i ОКИИ попадает в красную область.
3. Если в шаблоне $pattern1_i$ все единицы, накладываем расширенный шаблон $pattern2_i$. Если в него попадает хотя бы один ноль, ОКИИ переходит в желтую область по критерию i .
4. Если в матрице есть нули за пределами шаблона $pattern2_i$, они считаются не значимыми для критерия i , и по нему ОКИИ остается в зеленой зоне.

Алгоритм повторяется для всех значимых критериев.

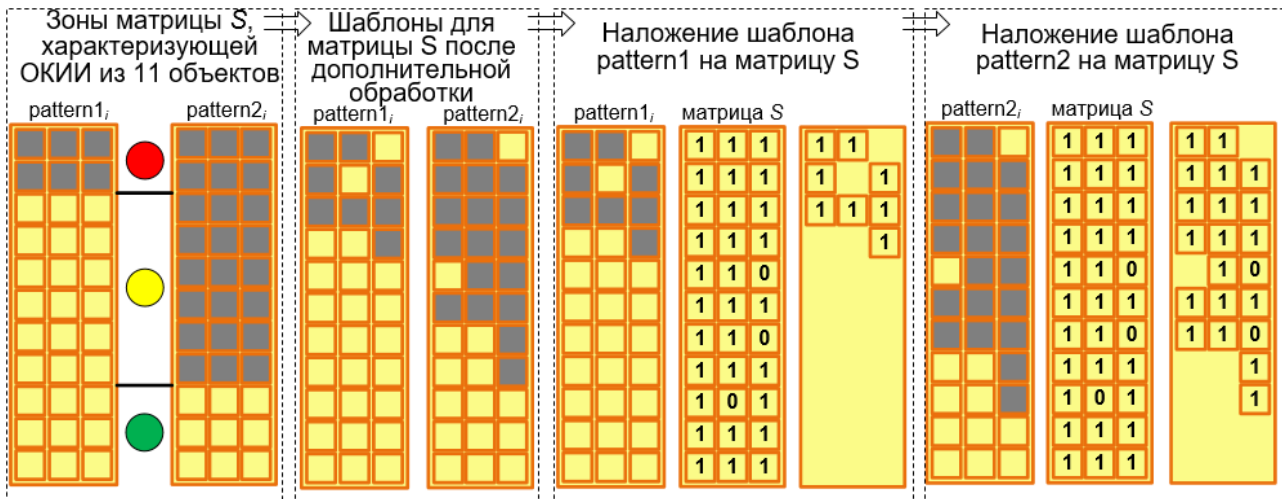


Рис. 4. Наложение шаблонов $pattern1_i$ и $pattern2_i$ на матрицу S

На **седьмом этапе** производится расчет потенциального ущерба при попадании ОКИИ в зону риска. Для любой матрицы S , характеризующей состояние ОКИИ, существует единственный вектор, полученный интеграцией r отображений $f_1(S), \dots, f_r(S)$.

После того как будут проанализированы возможности всех потенциально опасных субъектов/объектов строим матрицу ущербов (табл. 3).

Таблица 3

Матрица ущербов

Цветовая зона	Ущерб для каждого из критериев						
	γ_1	γ_2	γ_3	γ_4	γ_5	...	γ_r
●	d_{11}	d_{12}	d_{13}	d_{14}	d_{15}	...	d_{1r}
●	d_{21}	d_{22}	d_{23}	d_{24}	d_{25}	...	d_{2r}

По каждому из критериев ущерба считаются независимыми; поэтому общий ущерб вычисляется как сумма по всем компонентам. Имея вектор γ , по этой матрице легко рассчитать суммарные потери от единичного исполнения того или иного сценария атаки:

$$D_{total} = \sum_{i=1}^r d_{ji}(\gamma_i), j = 1, 2.$$

Естественно считать, что при $\gamma_i = \bullet$, $d(\gamma_i) = 0$, а также что первая строка в матрице не меньше второй: $d_{1i} \geq d_{2i}$.

По этим значениям можно вычислить аддитивный показатель «опасности» от атакующих действий:

$$E[D_{total}] = \sum_{k=1}^m D_{total}(k),$$

где m – количество S^* матриц.

Пока не будут оценены все S^* матриц всех потенциально реализуемых траекторий, повторяются этапы 6 и 7.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный метод позволяет определить наиболее критичные элементы ОКИИ на основании анализа интенсивности потоков документооборота, а также уязвимости структурных элементов организационно-технической системы, которые могут быть выбраны нарушителем в качестве потенциальных объектов для воздействия.

В результате применения предложенного метода возможно выявить наиболее предпочтительные для нарушителя процессы, потенциальные сценарии развития атаки, рассчитать потенциальный ущерб от единичного воздействия и общий ущерб.

Список используемых источников

1. Андрушкевич Д. В., Фоменко К. Э., Тимашов П. В. Поддержание требуемого уровня защищенности элементов критической информационной инфраструктуры на основе квалиметрического подхода // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. – 2019. – № 4. – С. 40–44.

2. Модель изменения доступности знаний, представленных в памяти киберсистемы, обеспечивающей нейтрализацию деструктивных воздействий на объекты критической информационной инфраструктуры / Д. Н. Бирюков [и др.] // Научные технологии в космических исследованиях Земли. – 2016. – Т. 8, № 4. – С. 56–63.

3. Корниенко А. А., Глухов А. П. Модели и методы риск-ориентированного проактивного управления информационной безопасностью железнодорожной транспортной системы // Бюллетень объединенного ученого совета ОАО «РЖД». – 2018. – С. 42–54.

4. Подход к обработке знаний в памяти интеллектуальной системы / Д. Н. Бирюков [и др.] // Естественные и технические науки. – 2015. – № 11(89). – С. 455–466.

А. Г. Ломако,
доктор технических наук, профессор;
А. Б. Менисов,
кандидат технических наук

ПОДХОД К ОЦЕНИВАНИЮ РИСКОВ СНИЖЕНИЯ КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА АССОЦИАЦИЙ

Внедрение систем искусственного интеллекта (СИИ) в состав объектов критической информационной инфраструктуры требует всестороннего анализа постоянно возникающих угроз компьютерного нападения. За последние годы злоумышленники улучшили свои тактику и техники при проведении компьютерных атак. Научно-технологическая область надежной разработки и эксплуатации СИИ столкнулась с проблемами администрирования защиты таких систем и их компонентов. Предметом исследования является область оценивания рисков снижения качества функционирования объектов критической информационной инфраструктуры, содержащих СИИ. Новизна разработанного подхода заключается в возможности повышения точности, достоверности и оправданности определения и прогнозирования рисков снижения качества функционирования взаимозависимых компонентов СИИ различных архитектур. Подход предполагает сбор и обработку данных о реализации компьютерных атак на компоненты СИИ, поиск типов атрибутов тактик и техник злоумышленников, анализ ассоциаций и определение взаимосвязи с компонентами окружающей инфраструктуры. Основные результаты заключаются в обеспечении возможности детализации потенциального профиля компьютерной атаки на СИИ с использованием алгоритмов поиска ассоциативных правил. В статье описаны результаты проведенного эксперимента по определению рисков снижения качества функционирования СИИ, исходными данными для которого являются описания компьютерных атак MITRE ATT&CK. Полученные с помощью алгоритма Априори результаты продемонстрировали, что идея использования анализа ассоциаций, может быть применена в формировании базиса для решения проблемы защиты СИИ от компьютерных атак.

Ключевые слова: информационная безопасность, системы искусственного интеллекта, оценивание рисков, анализ данных, ассоциативные правила.

ВВЕДЕНИЕ

Внедрение систем искусственного интеллекта (СИИ) в информационную инфраструктуру требует учета ряда возникающих угроз. СИИ – это целый стек технологий, состоящий из методов и алгоритмов искусственного интеллекта, фреймворков машинного обучения (например, TensorFlow, PyTorch), а также инфраструктурных решений для их поддержки (облачные системы, специализированные программные и аппаратные средства и др.). Помимо уязвимостей программного обеспечения эти технологии являются источниками принципиально новых типов ошибок и уязвимостей, которые открывают новые возможности для проведения компьютерных атак злоумышленниками (состязательные примеры, закладки, инверсия модели машинного обучения и восстановление обучающих данных) [1]. Это особенно важно в вопросах надежного функционирования объектов критической информационной инфраструктуры (КИИ), таких как информационные системы, информационно-телекоммуникационные сети и автоматизированные системы управления [2].

Обеспечение надежности функционирования СИИ требует исследования вопросов разработки [3–5], интеграции в объекты КИИ [7, 8] и сопровождения восстановления работоспособности после проведения компьютерных атак.

При получении информации о том, что определенная СИИ подвергается компьютерной атаке, специалисты по информационной безопасности должны определить масштаб поражения и план нейтрализации последствий. Оба этапа сложны, потому что, во-первых, СИИ тес-

но интегрированы КИИ, где отказ одного из них может привести к непредвиденным последствиям для других объектов и компонентов. Во-вторых, расследование компьютерных инцидентов СИИ зависит от многих условий: фрейворка, алгоритма обучения (обучение с подкреплением или обучение с учителем) и среды (работа на хосте, в облаке или на периферии). Также сложен вопрос определения субъекта-злоумышленника. В-третьих, для СИИ стандартов и методологий оценивания рисков не существует, возможно из-за их возрастающей сложности и слабой интерпретируемости.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АТРИБУТОВ ТАКТИК И ТЕХНИК ЗЛОУМЫШЛЕННИКОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ КОМПЬЮТЕРНЫХ АТАК НА СИСТЕМЫ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Под риском снижения качества функционирования СИИ будем понимать потенциальную возможность использования уязвимостей элементов СИИ для причинения ущерба объекту КИИ. Оценивание рисков снижения качества функционирования СИИ включает идентификацию рисков (определение источников и событий, которые могут снизить качество), их анализ (анализ вероятности событий и последствий) и сравнительное оценивание (рис. 1).

Объект КИИ		Ущерб снижения качества функционирования СИИ			
		Незначительный	Восстанавливаемый	Частично восстанавливаемый	Катастрофический
Опасность реализации	Вероятность	Средний	Выше среднего	Высокий	Высокий
	Весьма вероятно	Низкий	Средний	Выше среднего	Высокий
	Маловероятно	Низкий	Низкий	Средний	Выше среднего

Рис. 1. Матрица рисков снижения качества функционирования СИИ

Определим специфичные для СИИ степени ущерба:

1) незначительный – если СИИ обучается на данных, которые не используются в эксплуатации объектов КИИ и не имеет информации о производственных моделях машинного обучения;

2) восстанавливаемый – если компрометация СИИ повлияет на другие компоненты объектов КИИ; если СИИ используется в некритических приложениях объектов КИИ; имеет информацию о других моделях машинного обучения на других уровнях;

3) частично восстанавливаемый – если СИИ получает конфиденциальные данные или сведения, составляющие служебную тайну; компрометация СИИ будет иметь большое, но ограниченное негативное влияние;

4) катастрофический – если СИИ обучена или принимает конфиденциальные данные или сведения, составляющие государственную или служебную тайну; СИИ используется в критически важном объекте, так что компрометация может оказать большое негативное влияние; СИИ используется в приложениях, где возможен физический ущерб или смерть людей; СИИ используется в объектах критической информационной инфраструктуры.

Для определения опасности необходимо выявить взаимосвязи между источниками снижения качества функционирования СИИ – атрибутами техник и тактик злоумышленников при атаках на СИИ.

СИИ имеют диапазон атрибутов, связанных с компьютерными атаками: уклонения, отравления, репликации модели и использование традиционных уязвимостей программного обеспечения [9]. В силу этих особенностей был сформирован набор данных на основе общеизвестных атак на СИИ [10]. Данные, которые содержатся в этом наборе – это тактики и техники формата MITRE ATT&CK, эмпирические данные компьютерных атак на СИИ [11].

Таким образом, отчеты об известных атаках на СИИ содержат атрибуты тактик и техник злоумышленников, которые позволяют оценить риск. Однако малое количество отчетов (15 атак [12–26]), состоящее из 272 атрибутов, формирует необходимость прогнозирования новых сценариев действий злоумышленников, а также определения связей между тактиками и техниками компьютерных атак на различные СИИ.

ОПИСАНИЕ ПОДХОДА К ОЦЕНИВАНИЮ РИСКОВ СНИЖЕНИЯ КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА АССОЦИАЦИЙ

Целью подхода является детализация потенциального профиля компьютерной атаки на СИИ.

На рис. 2 представлена схема подхода к оцениванию риска снижения качества функционирования СИИ, который состоит из обработки данных компьютерных атак на СИИ, поиска и анализа ассоциаций и их применения для определения рисков.

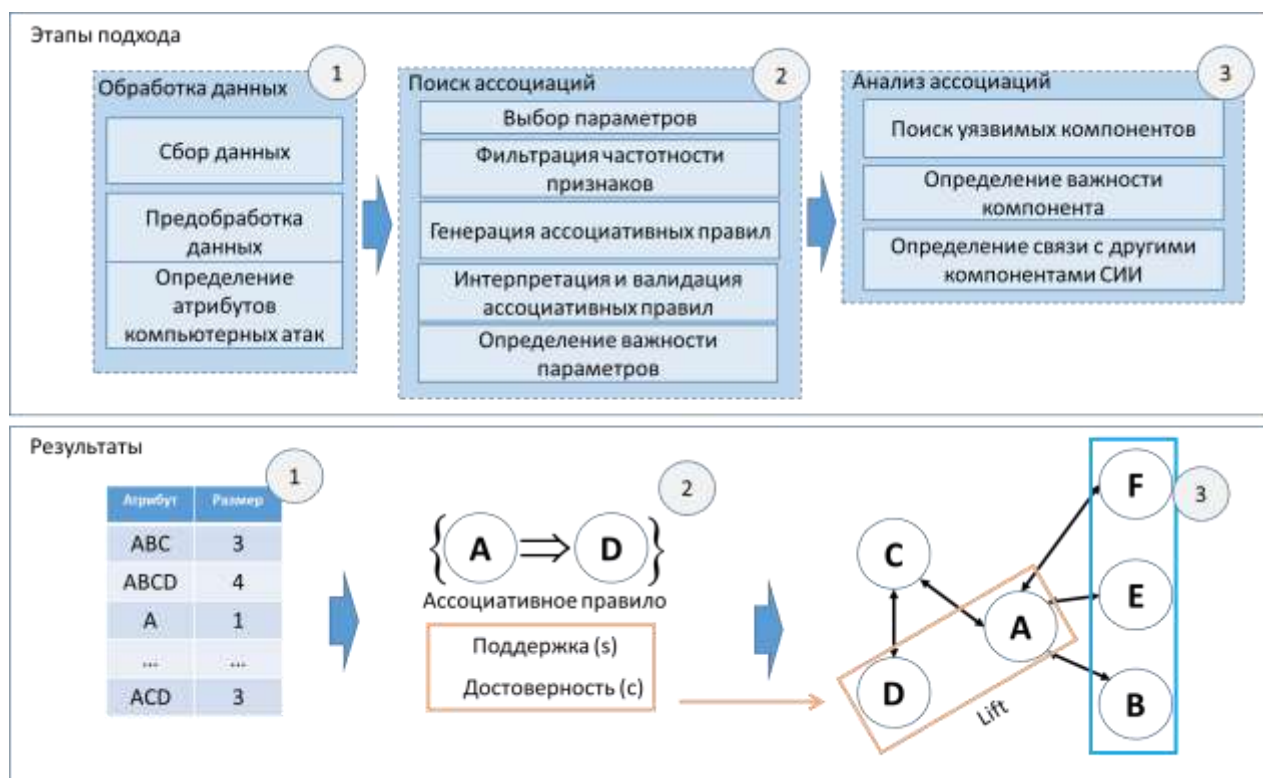


Рис. 2. Схема подхода к оцениванию рисков снижения качества функционирования СИИ

Для оценивания рисков снижения качества функционирования СИИ необходимо определить связи между атрибутами компьютерных атак на СИИ. Поскольку связи между атрибутами атак различаются, необходимо создать различные отношения следующего вида: ЕСЛИ → ТО, например: ЕСЛИ «изменение исходного файла» ТО «состязательная атака». Одним из инструментов поиска и выявления таких связей является поиск ассоциативных правил.

Предположим, что $I = \{i_1, i_2, \dots, i_n\}$ – набор атрибутов снижения качества функционирования СИИ, а D – база данных тактик и техник злоумышленников, где каждая запись T представляет собой набор атрибутов ($T \subseteq I$). Поиск ассоциативных правил полагается на параметры поддержки, достоверности и параметра важности (*lift*) при поиске взаимосвязей среди всех атрибутов. Поддержка является мерой частоты появления атрибута для разных атак, достоверность – это мера связи между наборами разных атрибутов. Ассоциативное правило (АП) имеет форму $X \Rightarrow Y$, где X – предшествующая часть правила, а Y – последующая часть набора атрибутов I , причем $X \subset I$, $Y \subset I$ и $X \cap Y = \emptyset$.

Также АП $X \Rightarrow Y$ имеет поддержку, т. е. вероятность того, что X и Y будут найдены вместе:

$$s \leq \frac{|X \cup Y|}{N}, \quad (1)$$

где N – количество записей в D .

Предполагая, что АП $X \Rightarrow Y$ присутствует в базе данных D , то достоверность правила определяется следующим выражением:

$$c \leq \frac{|X \cup Y|}{|X|}, \quad (2)$$

где $|X|$ – это количество вхождений набора признаков X в базу данных D .

Важность АП измеряется параметром *lift*, который измеряет, насколько часто X и Y встречаются вместе, чем если бы они были статистически независимыми:

$$lift = \frac{|X \cup Y|}{|X||Y|}, \quad (3)$$

где $lift \in [0, \infty]$; если $lift < 1$, то X и Y имеют обратную ассоциативную зависимость; если $lift = 1$, то X и Y независимы; если $lift > 1$ – имеют положительную связь.

Таким образом, алгоритмы поиска АП извлекают не все связи атрибутов снижения качества функционирования СИИ, а только их подмножество, которое удовлетворяет требованиям (1) и (2). Следовательно, реализация поиска АП может помочь аналитикам информационной безопасности изучить поведение злоумышленника при проведении компьютерных атак.

ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ЧАСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящее время наиболее широко используемым алгоритмом поиска АП является алгоритм Априори [27], который используется во многих прикладных задачах [28–31]. Алгоритм Априори состоит из двух этапов:

- 1) определение часто встречающегося набора атрибутов;
- 2) формирование АП.

На первом этапе он включает обнаружение всех частых атрибутов атак, которые имеют поддержку, превышающую или равную предварительно определенному минимальному значению поддержки. На втором этапе – создание всех соответствующих АП из частых наборов атрибутов. Дополнительно рассчитывается достоверность правил и отсекаются правила, которые не достигают минимального порогового значения достоверности.

Алгоритм Априори может обнаруживать группы атрибутов, часто встречающихся вместе во множестве компьютерных атак на СИИ, и такие группы называются часто встречающимися наборами атрибутов. АП, созданные в результате этого процесса, измеряются с помощью поддержки, достоверности и параметра *lift*. Учитывая набор атрибутов, необходимо

сформировать все АП, которые имеют поддержку и достоверность выше, чем минимальная поддержка ($\min(s)$) и минимальная достоверность ($\min(c)$) соответственно.

Данные каждой атаки на СИИ [12–26] были объединены, чтобы сформировать одну базу данных D , состоящую из 15 векторов (от 8 до 31 атрибута). Минимальное значение поддержки составляет 0,003, а минимальное значение достоверности равно 0,2. Этой пороговой конфигурации соответствует 19 696 710 АП.

Совокупность наборов АП является объемной и сложно структурированной для изучения специалистами в предметной области. В качестве решения этой проблемы можно использовать параметры поддержки и *lift* для фильтрации или ранжирования АП.

На рис. 3 представлены категории связи атрибутов компьютерных атак и их распределение. Есть три категории для интерпретации *lift* отношений атрибутов в АП. Если *lift* равен 1, это означает, что X и Y независимы (свободная связь). Если *lift* выше 1, это означает, что X и Y положительно связаны (сильная связь). Если *lift* сила меньше 1, это означает, что X и Y имеют отрицательную корреляцию (слабая связь). Атрибуты атак на СИИ независимы и это АП будет угрозой для объекта КИИ, когда ряд наборов АП имеет *lift* равным 1.

На рис. 4 представлены значения шести атрибутов с самой большой поддержкой в АП с порогом, настроенным как $\min(s) = 0,003$ и $\min(c) = 0,2$.

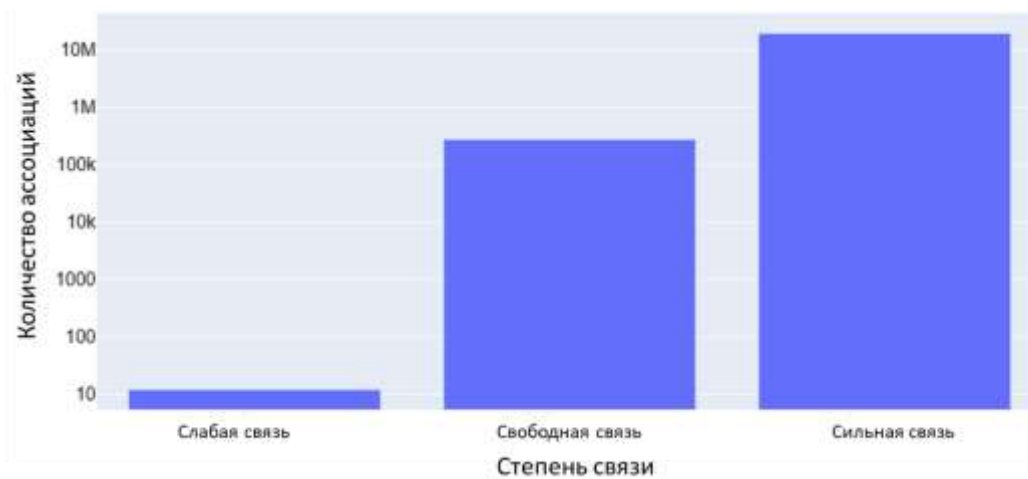


Рис. 3. Распределение ассоциаций по параметру важности *lift*

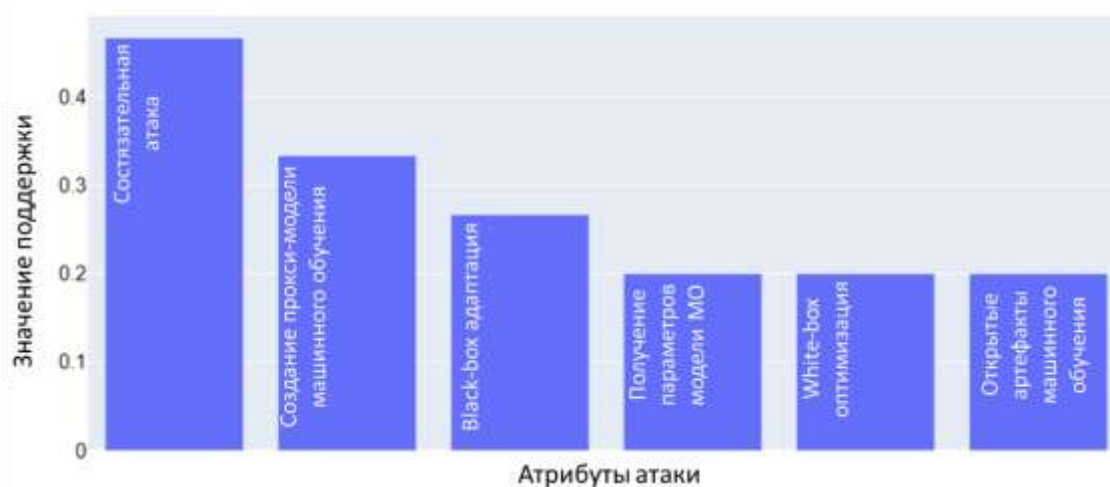


Рис. 4. Наиболее возможные атрибуты компьютерных атак на СИИ (по параметру поддержки ассоциаций)

Далее вычислим возможные риски проведения компьютерных атак для компонентов СИИ. Для этого за основу возьмем схему на рис. 1, вместо значения опасности определим показатель поддержки (1), а вместо шкалы ущерба – параметр важности $lift$. Таким образом, значение риска для двух составляющих ассоциативное правило определяется выражением

$$R(\textit{antecedent}, \textit{consequent}) = s_a \cdot lift_c, \quad (4)$$

где $\textit{antecedent}$ – антецедент;
 $\textit{consequent}$ – консеквент;
 s_a – поддержка антецедента;
 $lift_c$ – важность консеквента.

Полученный результат для наиболее значимых атрибутов компьютерных атак представлен на рис. 5¹.

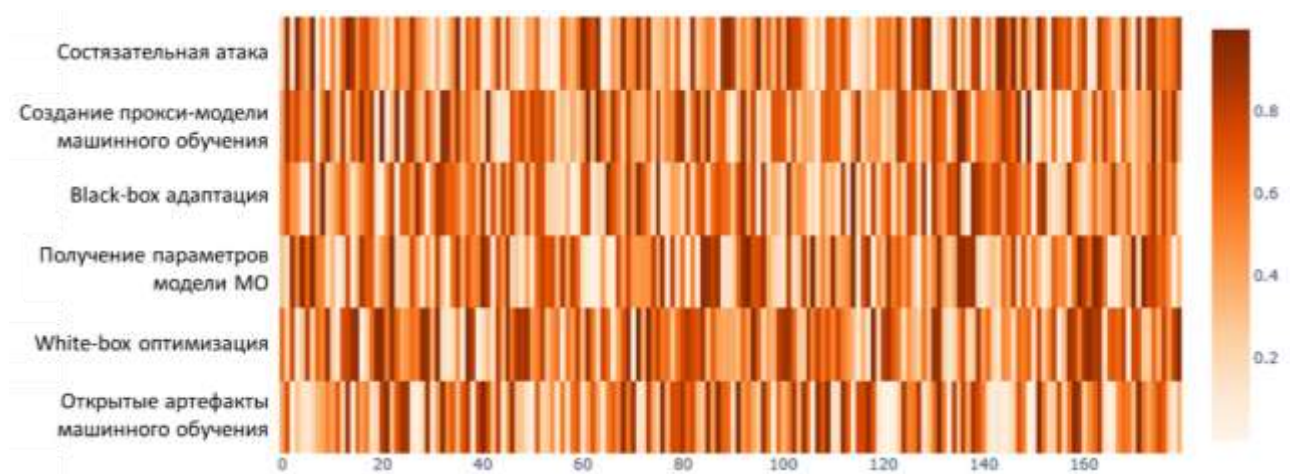


Рис. 5. Риски наиболее значимых атрибутов компьютерных атак

Результаты эксперимента показали, что риски наиболее значимых атрибутов совпадают с базой угроз ФСТЭК России [32]. Таким образом, использование данного математического аппарата для анализа связи между атрибутами снижения качества и поиска уязвимых компонентов СИИ имеет большое преимущество.

Стоит отметить, что наиболее часто встречающиеся в ассоциациях атрибуты атак обладают более высокой способностью влияния на СИИ. Так можно провести связь: риск снижения качества функционирования СИИ – угроза объекту КИИ – опасность КИИ.

Теория иерархических систем [33] может определить отношения между узлами сети, степень влияния и зависимости уровней друг от друга. В то же время сложная иерархическая система позволяет визуализировать взаимосвязь.

Основываясь на полученных результатах, АП обнаруживают взаимосвязи атрибутов проведения компьютерной атаки на СИИ (рис. 6). Эти АП могут помочь аналитикам информационной безопасности сосредоточиться на процессе восстановления штатного функционирования объектов информационной инфраструктуры. Дополнительно исходные данные можно обогатить с помощью логов сторонних инструментов, таких как *Apache Airflow*, *Kubeflow Pipelines*, *Luigi*, *AWS SageMaker Pipelines* и *Azure Pipelines*.

¹ Представленный вывод ограничен 180 консеквентами, так как диапазон наиболее значимых антецедентов от 39 035 до 76 216.

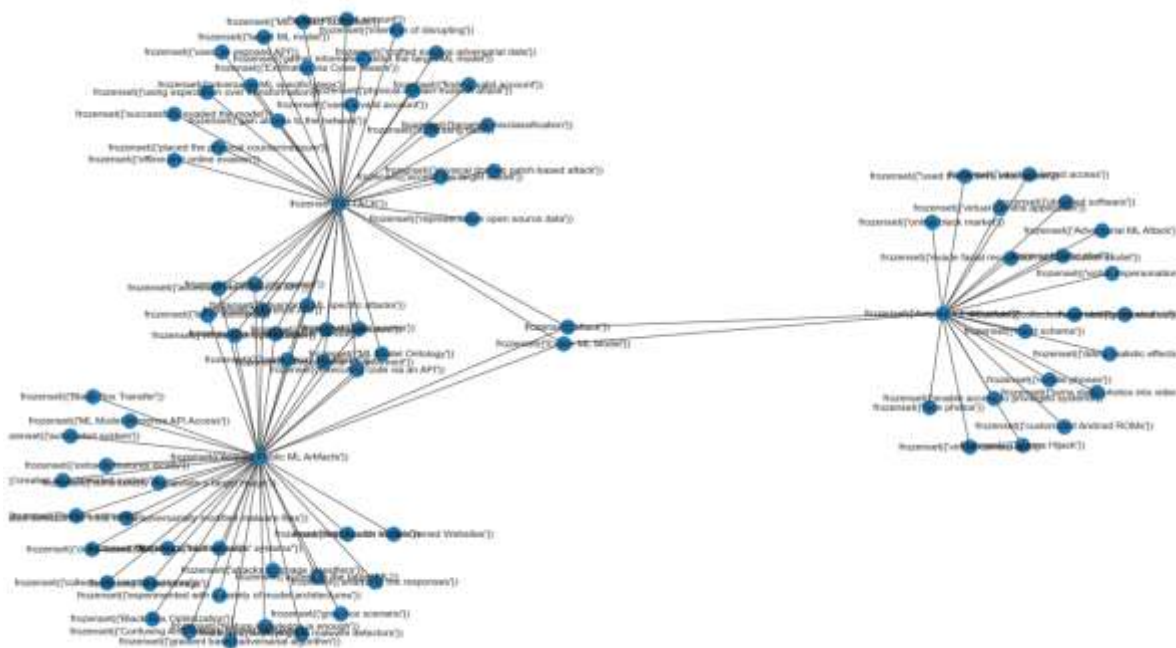


Рис. 6. Взаимосвязь атрибутов компьютерных атак на СИИ

Для моделирования сложной системы представим СИИ как группу отдельных узлов, соединенных ребрами. Как показано на рис. 6, компонент СИИ подвержен риску, ребра представляют собой существующую корреляцию между различными атрибутами, а его вес представляет собой степень зависимости между атрибутами атак. Следовательно, его узлы являются индикаторами снижения качества функционирования, соответствующим состоянию ассоциативных правил.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценивание рисков снижения качества функционирования систем искусственного интеллекта является ключевым вопросом, определяющим развитие данного технологического направления. Однако в настоящее время отсутствует результативный метод анализа факторов риска. Процесс сопровождения восстановления работоспособности СИИ после проведения компьютерных атак является наиболее актуальным по причине эксплуатации СИИ во многих направлениях КИИ. Интеллектуальная обработка больших массивов разнородной информации представляет собой мощный инструментарий для задач оценивания рисков снижения качества функционирования таких систем.

Поиск ассоциаций позволяет обнаружить новые знания, которые могут облегчить процесс атрибуции действий злоумышленников, направленных на снижение качества функционирования СИИ. Основные результаты заключаются в обеспечении возможности определения детализации потенциального профиля компьютерной атаки на СИИ с использованием алгоритмов поиска ассоциативных правил для оценивания рисков. В статье применен алгоритм Априори для обработки известных компьютерных атак на СИИ. Результаты эксперимента показали возможность нахождения, группировки и измерения взаимосвязи атрибутов компьютерных атак. Кроме того, результаты включают информацию о взаимосвязи различных компонентов СИИ. Для будущих исследований можно внедрить другие алгоритмы поиска ассоциативных правил и дополнительные статистические меры, чтобы повысить эффективность и точность поиска различных признаков снижения качества функционирования СИИ.

Список используемых источников

1. Ломако А. Г., Менисов А. Б. Ландшафт угроз безопасности информации технологий искусственного интеллекта // Сборник 31-й научно-технической конференции «Методы и технические средства обеспечения безопасности информации». – СПб. : СПбПУ, 2022. – С. 49.
2. О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации : фед. закон от 26 июля 2017 года № 187-ФЗ. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_220885/ (дата обращения: 30.03.2023).
3. Безопасное использование TensorFlow. – URL: <https://github.com/tensorflow/tensorflow/blob/master/SECURITY.md> (дата обращения: 30.03.2023).
4. Technical report on the cleverhans v2. 1.0 adversarial examples library / Papernot N. [et al.]. – URL: <https://arxiv.org/abs/1610.00768> (дата обращения: 05.05.23).
5. secml: A python library for secure and explainable machine learning / Melis M. [et al.]. – URL: <https://arxiv.org/abs/1912.10013> (дата обращения: 05.05.23).
6. Adversarial machine learning-industry perspectives / R. S. S. Kumar [et al.] // IEEE Security and Privacy Workshops (SPW). – 2020. – P. 69–75.
7. «Лаборатория Касперского» откроет первый Центр прозрачности в Азиатско-Тихоокеанском регионе. – URL: https://usa.kaspersky.com/about/press-releases/2019_kaspersky-to-open-first-transparency-center-in-apac (дата обращения: 30.03.2023).
8. Huawei Cyber Security Transparency Centre. – URL: <https://www.huawei.com/en/trust-center/transparency> (дата обращения: 30.03.2023).
9. Artificial Intelligence Cybersecurity Challenges. Threat Landscape for Artificial Intelligence / B. Caroline [et al.]. – URL: <https://www.enisa.europa.eu/publications/artificial-intelligence-cybersecurity-challenges> (дата обращения: 30.03.2023).
10. Case Studies. – URL: <https://atlas.mitre.org/studies/> (дата обращения: 30.03.2023).
11. ATLAS Navigator. – URL: <https://mitre-atlas.github.io/atlas-navigator/> (дата обращения: 30.03.2023).
12. URLNet: Learning a URL representation with deep learning for malicious URL detection / H. Le [et al.]. – URL: <https://arxiv.org/abs/1802.03162> (дата обращения: 05.05.23).
13. Character level based detection of DGA domain names / B. Yu [et al.] // International joint conference on neural networks (IJCNN). – 2018. – P. 1–8.
14. VirusTotal Poisoning. – URL: <https://atlas.mitre.org/studies/AML.CS0002/> (дата обращения: 30.03.2023).
15. Cylance, I Kill You! – URL: <https://skylightcyber.com/2019/07/18/cylance-i-kill-you/> (дата обращения: 30.03.2023).
16. Faces Are the Next Target for Fraudsters. – URL: <https://www.wsj.com/articles/faces-are-the-next-target-for-fraudsters-11625662828> (дата обращения: 30.03.2023).
17. Wallace E., Stern M., Song D. Imitation attacks and defenses for black-box machine translation systems. – URL: <https://arxiv.org/abs/2004.15015> (дата обращения: 05.05.23).
18. Security lapse exposed Clearview AI source code. – URL: <https://techcrunch.com/2020/04/16/clearview-source-code-lapse/> (дата обращения: 30.03.2023).
19. OpenAI Said Its Code Was Risky. Two Grads Re-Created It Anyway. – URL: <https://www.wired.com/story/dangerous-ai-open-source/> (дата обращения: 30.03.2023).
20. CVE-2019-20634 Detail. – URL: <https://nvd.nist.gov/vuln/detail/CVE-2019-20634> (дата обращения: 30.03.2023).
21. In 2016, Microsoft’s Racist Chatbot Revealed the Dangers of Online Conversation. – URL: <https://spectrum.ieee.org/in-2016-microsofts-racist-chatbot-revealed-the-dangers-of-online-conversation> (дата обращения: 30.03.2023).
22. Microsoft Azure Service Disruption. – URL: <https://atlas.mitre.org/studies/AML.CS0010/> (дата обращения: 30.03.2023).

23. Microsoft Edge AI Evasion. – URL: <https://atlas.mitre.org/studies/AML.CS0011/> (дата обращения: 30.03.2023).
24. Face Identification System Evasion via Physical Countermeasures. – URL: <https://atlas.mitre.org/studies/AML.CS0012/> (дата обращения: 30.03.2023).
25. Deeppayload: Black-box backdoor attack on deep learning models through neural payload injection / Y. Li [et al.] // IEEE/ACM 43rd International Conference on Software Engineering (ICSE). – 2021. – P. 263–274.
26. How to confuse antimalware neural networks. Adversarial attacks and protection. – URL: <https://securelist.com/how-to-confuse-antimalware-neural-networks-adversarial-attacks-and-protection/102949/> (дата обращения: 30.03.2023).
27. *Городецкий В. И., Самойлов В. В.* Ассоциативный и причинный анализ и ассоциативные байесовские сети // Информатика и автоматизация. – 2009. – № 9. – С. 13–65.
28. Fast algorithms for mining association rules / R. Agrawal [et al.] // Proc. 20th int. conf. very large data bases, VLDB. – 1994. – Vol. 1215. – P. 487–499.
29. Identifying patterns of safety related incidents in a steel plant using association rule mining of incident investigation reports / A. Verma [et al.] // Safety science. – 2014. – Vol. 70. – P. 89–98.
30. *Xu R., Luo F.* Risk prediction and early warning for air traffic controllers' unsafe acts using association rule mining and random forest // Safety science. – 2021. – Vol. 135. – P. 105125.
31. Association rules mining analysis of app usage based on mobile traffic flow data / Y. Liu [et al.] // IEEE 3rd International Conference on Big Data Analysis (ICBDA). – 2018. – P. 55–60.
32. Список угроз ФСТЭК. – URL: <https://bdu.fstec.ru/threat> (дата обращения: 30.03.2023).
33. *Мако Д., Месарович М., Такахара И.* Теория иерархических многоуровневых систем. – М. : Мир, 1973. – 344 с.

В. А. Овчаров,
доктор технических наук;
А. С. Подшибякин

ТЕХНОЛОГИЯ ЗАЩИТЫ МОБИЛЬНЫХ БЕСПРОВОДНЫХ УСТРОЙСТВ ОТ АТАК ОТСЛЕЖИВАНИЯ

В настоящее время мобильные беспроводные устройства (МБУ) используют незашифрованные каналы для обмена служебными данными с другими устройствами. В целях предотвращения отслеживания используемых общедоступных каналов МБУ используют периодически меняющийся случайный идентификатор вместо постоянного MAC-адреса (*Media Access Control* – MAC). В статье показано, что МБУ, поддерживающие спецификации стандарта *Bluetooth* версии 4.0 и выше, уязвимы для атак пассивной идентификации местоположения, в результате которых нарушитель может извлечь идентифицирующие токены из полезной нагрузки сообщений, в том числе, для последующего получения доступа к устройству. Разработан оригинальный алгоритм предотвращения несанкционированной идентификации местоположения *Windows*-, *Linux*- и *Android*-устройств, поддерживающих технологию *Bluetooth Low Energy* (BLE).

Ключевые слова: несанкционированная идентификация местоположения, конфиденциальность, утечка информации, побочные каналы, МБУ, IoT-устройства, анализ трафика.

ВВЕДЕНИЕ

Технология *Bluetooth* упростила взаимодействие различных МБУ и многочисленных IoT-устройств (*Internet of Things*, IoT). В ранних версиях спецификации *Bluetooth* постоянные MAC-адреса устройств регулярно транслировались в открытом виде, что приводило к возможности их отслеживания [1]. С введением стандарта BLE производители оборудования разработали технологию рандомизации MAC-адреса для предотвращения отслеживания МБУ [1]. Однако требования к реализации встроенных алгоритмов предотвращения несанкционированной идентификации местоположения в настоящее время четко не определены и носят рекомендательный характер. Необязательность реализации функций обеспечения конфиденциальности в МБУ с поддержкой BLE привела к тому, что не все такие устройства используют рандомизацию MAC-адресов и, как следствие, позволяют осуществлять несанкционированную идентификацию местоположения их пользователей.

Использование современными BLE-устройствами (в том числе, работающими под управлением операционных систем (ОС) *Windows 10*, *macOS* и *iOS 12.x*) широковещательных незашифрованных каналов позволяет потенциальному нарушителю анализировать информацию об устройстве и его пользователе, даже несмотря на использование технологии рандомизации адресов. Выявление идентифицирующих токенов, которые являются уникальными для каждого МБУ и остаются статичными достаточно долгое время, позволяет их использовать в качестве вторичных идентификаторов наряду с MAC-адресами. В данном случае нарушитель использует тот факт, что идентифицирующие токены и случайный адрес не изменяются синхронно.

Таким образом, нарушитель имеет возможность отслеживать устройства, которые используют динамически рандомизированные адреса, изменяющиеся в зависимости от параметров регенерации, установленных производителями МБУ. Кроме того, дефекты в алгоритмах рандомизации адресов МБУ на базе ОС *Android* позволяют определять типы устройств с помощью MAC-префиксов, MAC-адресов, а также информации, содержащейся в передаваемых WPS-атрибутах. Нарушитель может использовать пассивный метод отслеживания, основанный на отложенном извлечении идентифицирующих токенов в полезной нагрузке BLE-сообщений.

СПЕЦИФИКА КАНАЛЬНОГО УРОВНЯ ТЕХНОЛОГИИ BLUETOOTH LOW ENERGY

Bluetooth – это протокол беспроводной связи в диапазоне ISM 2,4 ГГц. Спецификация BLE представлена в 2010 г. одновременно с выходом *Bluetooth 4.0*. Спецификация *Bluetooth 5.0*, являющаяся дальнейшим развитием BLE, включает многочисленные функциональные дополнения и расширяет дальность связи до 400 м [1, 2]. Это значительно расширяет радиус действия потенциального нарушителя, а в совокупности с возможностью автоматизированной удаленной координации деструктивных действий может обеспечить несанкционированную идентификацию местоположения МБУ в режиме времени, близком к реальному.

Технология BLE работает на 40 физических каналах, разнесенных с шагом 2 МГц от 2402 МГц до 2480 МГц. Три из них являются так называемыми рекламными каналами, функционирующими на частотах 2402, 2426 и 2480 МГц. Эти каналы используются для трансляции рекламных сообщений различных типов: периодических объявлений о присутствии МБУ, запросов сканирования, адресованных другим устройствам, маяков (*beacons*), содержащих метаданные местоположения, и другую общедоступную информацию. Остальные каналы применяются для передачи данных между сопряженными устройствами и используют схему скачкообразного изменения псевдослучайного канала, которая согласовывается между двумя сторонами при соединении, чтобы избежать помех с другим трафиком полосы ISM.

Рассмотрим формат рекламного пакета (рис. 1,а), поскольку именно данные пакеты могут быть использованы для идентификации местоположения BLE-устройств. Пакет состоит из преамбулы, адреса доступа (AA), блока данных полезной нагрузки (*Protocol Data Unit – PDU*) и поля CRC. PDU рекламного канала состоит из заголовка и полезной нагрузки в зависимости от типа PDU, определенного в заголовке (рис. 1,б).

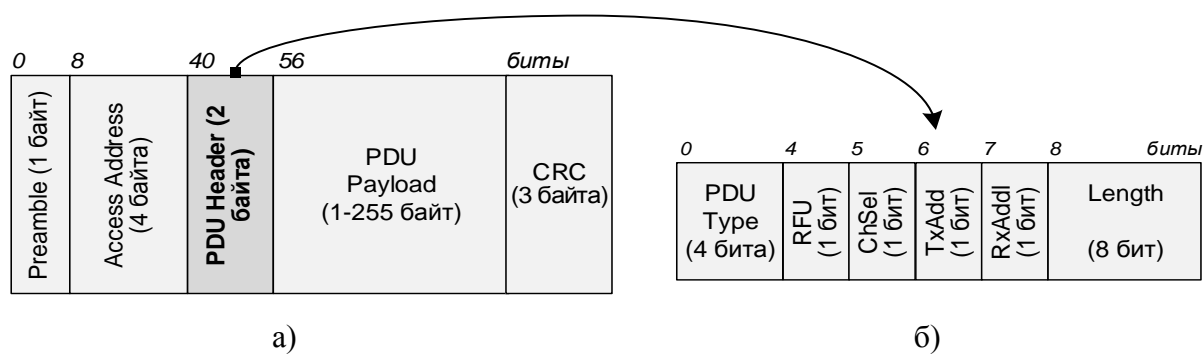


Рис. 1. Форматы:
а – рекламного пакета; б – PDU-заголовка

Полезная нагрузка содержит рекламный (*Advertising Address – AdvA*) и целевой (*Target Address – TargetA*) адреса (рис. 2). При этом только устройства с целевым адресом могут инициировать соединение, отправив запрос на подключение.

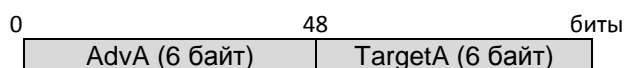


Рис. 2. Формат полезной нагрузки (PDU)

Широковещательная передача рекламных пакетов позволяет любому МБУ, принимающему PDU, ответить на соответствующий запрос. Полезная нагрузка PDU для данного типа пакетов содержит рекламный адрес (*Advertising Address – AdvA*) и рекламные данные

(Advertising Data – AdvData), которые могут содержать одну или несколько AD-структур. Наконец, типы AD определяют содержимое данных AD, содержащихся в каждой AD-структуре. Результаты анализа различных типов данных AD, используемых в процессе декодирования BLE-трафика, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты анализа типов данных AD, используемых для идентификации

Тип AD	Имя	Описание
0x01	Флаги	Флаги возможностей BLE
0x06	Список 128-битных UUID-сервисов	Глобальный уникальный идентификатор для определенной службы МБУ
0x09	Полное локальное имя	Полное локальное имя устройства
0x16	Сервисные данные	UUID службы согласно [4]
0xFF	Специфичные данные производителя	Пользовательский контейнер данных заданной структуры

Тип данных 0xFF заслуживает особого внимания, поскольку дает производителям устройств гибкость при определении дополнительных структур в поле AD. На рис. 3 показан формат структуры AD, позволяющий производителям разрабатывать собственные протоколы (например: *Apple iBeacon*, *Google Eddystone*, *Radius Networks Alt Beacon* и др.).

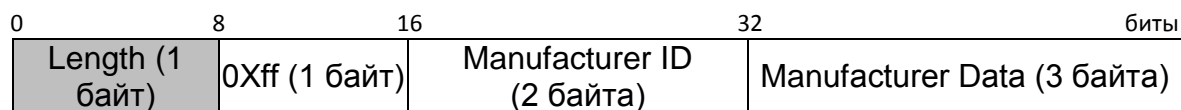


Рис. 3. Формат структуры AD, зависящей от производителя

Адрес, показанный на рис. 2 и 3, является 48-битным MAC-адресом МБУ, передающего рекламный пакет. Этот адрес может быть публичным или случайным, в зависимости от флага TxAdd в PDU-заголовке. Публичный адрес (TxAdd=0) является стандартным 48-битным MAC-адресом, присвоенным IEEE, в котором 24 младших бита назначены производителем, а 24 старших – представляют назначенный IEEE идентификатор компании. Данные адреса связаны с конкретным аппаратным обеспечением, что делает их уязвимыми для долгосрочного отслеживания, если они используются в процессе информационного обмена.

Случайные адреса (TxAdd=1) могут быть статическими. В этом случае они генерируются случайным образом всякий раз, когда МБУ перезагружается или переподключается, что также делает их уязвимыми для долгосрочного отслеживания. Случайные адреса могут быть либо неразрешимыми, состоящими из набора случайных чисел, либо могут быть разрешены в качестве постоянного адреса доверенными устройствами, имеющими ключ восстановления (*Identity Resolving Key – IRK*). Разрешаемые и неразрешимые случайные адреса можно различить по их двум старшим значащим битам, установленным в 0b01 и 0b00 соответственно.

ОБОСНОВАНИЕ МОДЕЛИ НАРУШИТЕЛЯ

Исходя из вышеизложенного, в работе рассматривается пассивный внешний нарушитель, который постоянно перехватывает и читает, но никогда не удаляет и не изменяет анализируемый BLE-трафик. В частности, нарушитель никогда не отправляет запросы на сканирование или запросы на установление соединения и остается полностью пассивным во время атаки, не инициируя двунаправленного взаимодействия с целевым МБУ. Также нарушитель

способен отслеживать текущий BLE-трафик для фиксации изменений в рекламных сообщениях по мере их возникновения.

На идентифицируемом МБУ активирован (включен) *Bluetooth*. Нарушителю необходимо только наблюдать рекламные *Bluetooth*-сообщения, отправляемые в открытом виде, и не требуется анализировать зашифрованные данные или следить за переключением каналов. Кроме того имеется возможность использования программно-определяемого радиоустройства (*Software-Defined Radio* – SDR) для мониторинга одного из *Bluetooth*-каналов (37, 38 или 39). Собранные и декодированные пакеты дополнительно анализируются на предмет наличия специфичных данных, которые могут быть использованы для идентификации местоположения МБУ и пользователя.

В определенный момент появляется возможность установить связь между произвольным идентификатором в рекламном сообщении и связанным с ним реальным устройством, а также постоянно наблюдать текущий рекламный BLE-трафик, чтобы отслеживать МБУ в течение максимально длительного времени. Успех нарушителя определяется как способность отслеживать МБУ в течение временного интервала рандомизации его адреса с помощью локального, пассивного, непрерывного наблюдения. МБУ отслеживаются для последующей идентификации их пользователей, поэтому способность отслеживать МБУ подразумевает возможность отслеживать его пользователя.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАБОРА ИДЕНТИФИЦИРУЮЩИХ ТОКЕНОВ

Предлагаемые метрики ориентированы на способность нарушителя отслеживать МБУ с течением времени по некоторой наблюдаемой сигнатуре. В частности, пусть *коэффициент анонимности* AS_u представляет множество пользователей, которых невозможно выделить из общего числа пользователей u , т. е.

$$|AS_u| = \text{количество пользователей, неотличимых от пользователя } u. \quad (1)$$

Следующей метрикой, представляющей практический интерес, является максимальное время отслеживания (*Maximum Tracking Time* – МТТ), которое определим как совокупное время, в течение которого пользователь u может быть однозначно идентифицирован, т. е.

$$MTT_u = \text{время, в течение которого } |AS_u| = 1 \text{ для пользователя } u. \quad (2)$$

Алгоритм отслеживания МБУ состоит из этапа предварительной обработки данных в автономном режиме и этапа онлайн-идентификации.

На этапе предварительной обработки анализируются файлы, содержащие декодированные рекламные BLE-пакеты (см. рис. 1) и их полезные данные PDU в необработанном формате. Все собранные дампы обрабатываются в автономном режиме [3] для выявления потенциальных идентифицирующих токенов, содержащихся в рекламных сообщениях, которые позволяют отличить одно устройство от другого по соответствующему рекламному адресу. Идентифицирующий токен для данного устройства должен оставаться фиксированным в течение определенного периода времени и является уникальным (его значения не вступают в коллизии со значениями, сгенерированными другими устройствами в пределах соответствующего временного интервала).

Набор идентифицирующих токенов для заданного класса МБУ зависит от его ОС и аппаратных (программных) функций, специфичных для данных устройств, поскольку все эти факторы определяют структуру и содержание рекламных сообщений. В этом смысле универсальный MAC-адрес является идеальным идентифицирующим токеном, поскольку он гарантированно уникален для МБУ и постоянно связан с устройством. Идентификация токенов

может осуществляться либо путем просмотра необработанной полезной нагрузки PDU (*Protocol data unit* – блок протокольных данных) и выделения последовательности байт, удовлетворяющей изложенным выше требованиям, либо путем разбивки полезной нагрузки в соответствии со спецификацией протокола *Bluetooth* и определения подходящих элементов метаданных.

Чтобы избежать коллизий между идентифицирующими токенами, важно, чтобы длина n бит идентифицирующего токена была достаточно большой. Если нарушитель стремится отслеживать BLE-устройство в течение определенного периода времени, например, одной недели, в области, содержащей не более m других BLE-устройств с одинаковыми типами идентифицирующих токенов (МБУ с разными идентифицирующими токенами несложно различить), где каждое устройство меняет свой идентифицирующий токен со скоростью не быстрее, чем раз в 15 минут (проведенные эксперименты показали, что значение 15 минут является верхней границей частоты смены идентифицирующих токенов), то целевое МБУ будет генерировать не более $k = 672$ токенов в неделю [2].

Пусть каждый идентифицирующий токен генерируется случайным образом равномерно (предположение, основанное на полученных экспериментальных данных). Вероятность того, что другое *Bluetooth*-устройство выдаст токены, которые не конфликтуют с одним из этих k токенов, составляет не менее $(1 - k / 2n)^k$.

Следовательно, применив неравенство Бернулли [4], вероятность того, что все другие m устройств выдают токены, отличные от целевого устройства, составляет не менее

$$p = (1 - k / 2n)^{mk} \geq 1 - mk^2 / 2^n. \quad (3)$$

Поэтому, выбирая $1 - mk^2 / 2^n \geq 1 - p$ или $n \geq \lceil \log_2 (mk^2 / p) \rceil$, можно обеспечить вероятность коллизии, меньшую, чем p . Например, для $m = 1000$ устройств и $p = 10^{-3}$ получаем $n \geq 39$ бит. Следовательно, идентифицирующие токены, которые имеют длину по меньшей мере 40 бит (5 байт), удовлетворяют этому неравенству.

Выполнение предварительной обработки требуется только один раз для каждого класса устройств. Как только для класса устройств найден подходящий набор идентифицирующих токенов, его можно применять для отслеживания любого отдельного МБУ в данном классе.

На этапе онлайн-отслеживания нарушитель применяет алгоритм переноса адреса, который непрерывно отслеживает изменения адреса и любые другие идентифицирующие токены, обнаруженные на этапе предварительной обработки. Алгоритм прослушивает входящие рекламные сообщения m_i , когда они транслируются на одном из рекламных BLE-каналов с целью отслеживания целевого МБУ D за пределами точки, в которой оно рандомизирует свой рекламный адрес.

Если входящее сообщение содержит правильные идентифицирующие токены для соответствующего класса устройств, к которому относится D , токены извлекаются. Затем, если входящий рекламный адрес идентичен существующему рекламному адресу, аналитик по-прежнему знает идентификатор устройства и обновляет хранимые значения идентифицирующих токенов, если обнаружены какие-либо изменения. В противном случае, если рекламный адрес изменился, попытка сопоставления выполняется с использованием любого из доступных идентифицирующих токенов в качестве псевдоидентификации – в случае успешного сопоставления адрес устройства D может быть обновлен с помощью входящего адреса, и перенос адреса будет успешным. В любом из этих случаев счетчик тайм-аута сбрасывается, указывая, что устройство D успешно отслеживается. Если в течение определенного периода времени T_{\max} совпадений ни адреса, ни идентифицирующего токена не обнаружено, предполагается, что отслеживание устройства не выполнено и алгоритм завершается.

ФОРМИРОВАНИЕ ИДЕНТИФИКАЦИОННЫХ ТОКЕНОВ

Для формирования идентифицирующих токенов использовалась модифицированная версия BLE-анализатора на базе SDR *Xianjun Jiao's*, а также *Bluetooth*-анализатор для исследования различных реализаций *Bluetooth* и анализа необработанных данных, которые, как правило, отбрасываются сетевым стеком физического уровня. Рассматривался трафик, содержащий два типа рекламных сообщений: *OS Advertising* и *Accessory Activation*.

На этапе предварительной обработки исследовались идентифицирующие токены, которые могут использоваться для отслеживания МБУ за пределами их рандомизации адресов. МБУ на базе *Windows 10* объявляют полезную нагрузку PDU только с одной структурой AD типа данных. Специфичные данные производителя представлены на рис. 4.

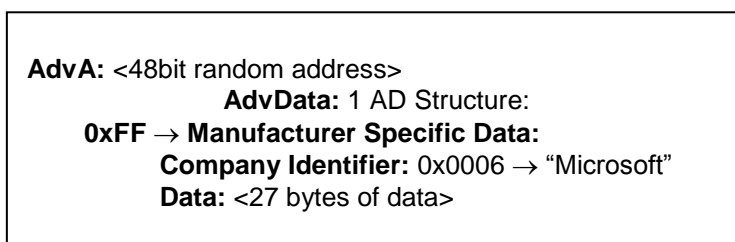


Рис. 4. Полезная нагрузка в *Windows 10*, содержащая единую AD-структуру «Специфичные данные производителя»

Специфичные данные производителя, содержащиеся в PDU, начинаются с идентификатора компании (для *Microsoft 0x0006*) и 27 байт проприетарных данных (рис. 4), состоящих из четырех фиксированных байт, за которыми следуют 23 переменных байта. Первые фиксированные байты не различаются между устройствами, т. е. не подходят для использования в качестве идентифицирующих токенов. Однако 23 переменных байта выглядят равномерно случайными и фактически являются уникальными для каждого устройства (рис. 5).

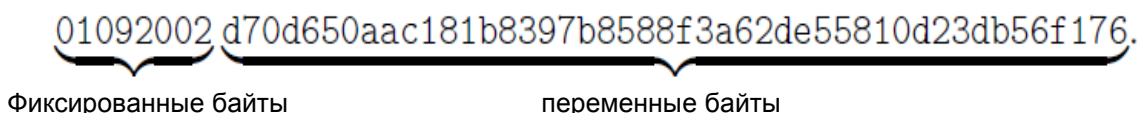


Рис. 5. Специфичные данные производителя

Кроме того, полезная нагрузка остается неизменной в течение приблизительно одного часа. Таким образом, идентификационный токен для МБУ под управлением *Windows 10* имеет вид

$$A_{win10} = [ManufSpecificData(\text{Специфичные данные производителя})[-23:]]. \tag{4}$$

Устройства под управлением *macOS* и *iOS* также регулярно обозначают свое присутствие. Скорость отправки рекламных сообщений в *macOS* и *iOS* намного выше, чем в *Windows 10*, до двух рекламных сообщений в секунду. Время жизни адреса варьируется: от секунд до двух часов, в среднем около 20 мин.

Типичный формат сообщения, как и в *Windows 10*, содержит поле данных, специфичное для производителя. Специфичные для производителя данные (рис. 6) используются для определенных функций в *iOS/macOS*, чему способствует технология BLE. Из наблюдаемых типов данных наиболее часто встречаются *nearby* и *handoff*.

```

AdvA: <48bit random address>
AdvData: 2 AD Structures:
  0x01 → Flags: 0x1a
  0xFF → Manufacturer Specific Data:
    Company Identifier: 0x004c → "Apple"
    Data: (nearby or handoff or both)
      nearby (0x10) <5 bytes of data>
      handoff (0x0c) <14 bytes of data>

```

Рис. 6. Типичная полезная нагрузка PDU устройств Apple, содержащая единую структуру AD «Специфичные данные производителя»

Структура типа *nearby* состоит из 5 байт данных. Структура данных *handoff* состоит из 14 байт данных, в которых первые байты всегда нулевые, а оставшиеся могут принимать произвольные значения, делая данную структуру хорошим кандидатом на роль идентификационного токена.

Очевидно, что типы данных, которые редко появляются в рекламных сообщениях, не подходят для идентификации токенов. Поэтому в статье рассматриваются *nearby*- и *handoff*-структуры данных как наилучшие кандидаты, поскольку они появляются на порядок чаще, чем любой другой тип данных.

Тип данных *airdrop* позволяет пользователям обмениваться файлами, используя специфичную для Apple комбинацию Wi-Fi и Bluetooth для одноранговой передачи файлов. *Airdrop* генерирует значительное число рекламных событий, которые запускаются всякий раз, когда пользователь нажимает кнопку «Обмен» в соответствующей ОС. Для этой цели *Airdrop* использует отдельный случайный рекламный адрес, который нельзя связать с обычным адресом, используемым для другой рекламы, что делает его непригодным в качестве идентифицирующего токена.

Эксперименты показали, что в целом не наблюдается различий в поведении рекламных сообщений между наблюдаемыми устройствами iOS/macOS и Astra Linux, которые указывали бы на заметные поведенческие [3] различия между Linux-системами. Поэтому единый идентифицирующий токен имеет вид:

$$A_{Linux} = A_{iOS} = A_{macOS} = [nearby, handoff]. \quad (5)$$

При этом МБУ под управлением ОС Linux имеют два идентифицирующих токена (*nearby*, *handoff*), которые меняются через разные интервалы. В большинстве случаев, значения идентифицирующих токенов изменяются синхронно с адресом. Однако в некоторых случаях смена токена происходит не в один и тот же момент, что позволяет алгоритму переноса идентифицировать следующий случайный адрес.

АЛГОРИТМ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ОТСЛЕЖИВАНИЯ МОБИЛЬНЫХ БЕСПРОВОДНЫХ УСТРОЙСТВ

Проведенные исследования показали, что автоматизация процедуры отключения/включения настроек Bluetooth в панели управления МБУ под управлением ОС Windows 10 не восстанавливает полезную нагрузку и адрес, используемые для широковещательного обмена, а лишь приостанавливает широковещательный обмен, приводя к сбросу, как рекламного адреса, так и полезной нагрузки. На рис. 7 показана схема алгоритма, обеспечивающего защиту МБУ от атак отслеживания, циклически выполняя сброс каждые x секунд, когда устройство не находится в состоянии соединения (чтобы не прерывать текущую связь).

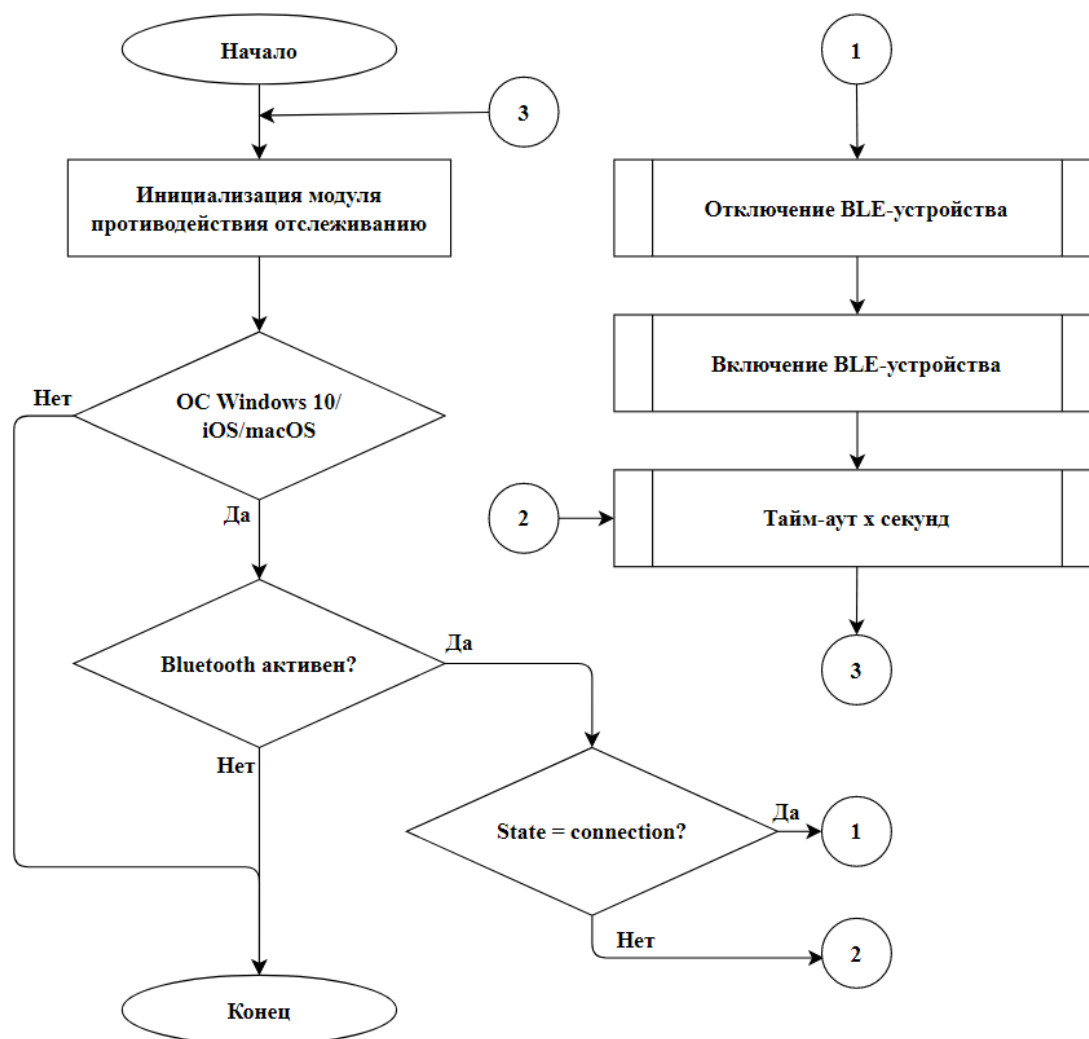


Рис. 7. Схема алгоритма предотвращения отслеживания МБУ

Следует отметить, что для МБУ под управлением ОС *Linux* применяется тот же подход, что показан на рис. 7. Выключение и включение *Bluetooth* в системных настройках приведет к случайному выбору адреса и изменению полезной нагрузки.

Также в качестве эффективного механизма противодействия несанкционированной идентификации фактов переноса адресов на МБУ и соответствующих пользователей в будущем необходимо реализовать алгоритм синхронизации изменения полезной нагрузки и рандомизации адресов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многочисленные производители МБУ/ИюТ-устройств по-разному подходят к реализации алгоритма рандомизации адресов, поддерживаемого технологией BLE, как в силу объективных требований по ограничению энергопотребления и использованию памяти на уровне устройства, так и в силу сложности программного обеспечения, а также в целях минимизации затрат на разработку.

Большинство операционных систем МБУ по умолчанию используют рандомизацию адресов в качестве средства предотвращения долгосрочного пассивного отслеживания, исходя из того, что постоянные идентификаторы не передаются. Однако, как было показано выше,

устройства под управлением *Windows 10*, *Linux* регулярно передают сообщения, содержащие специфичные структуры данных, которые используются для обеспечения взаимодействия платформы с другими устройствами в BLE-диапазоне. Наблюдая за поведением этих ОС, определено, что части этих структур данных позволяют реализовать мониторинг устройств за пределами рандомизации адресов.

Таким образом, любое устройство, которое регулярно передает данные, содержащие подходящие рекламные токены, будет уязвимо для алгоритма переноса, если оно не меняет все свои идентифицирующие токены синхронно с рекламным адресом. Указанная проблема нарушения конфиденциальности усугубляется ввиду широкого распространения вредоносных ботнет-сетей на основе BLE-устройств и дополнительными угрозами, связанными с удаленным мониторингом пользователей через скомпрометированные Wi-Fi-маршрутизаторы. Кроме того, дополнительные метаданные, такие как транзакции электронных платежей, а также другие цифровые отпечатки, могут быть объединены посредством технологии отслеживания МБУ для создания детального профиля местоположения его пользователя.

Дальнейшие исследования в данном направлении необходимо сосредоточить на анализе дополнительных факторов, таких как учет времени размещения рекламных сообщений. Другим интересным аспектом может быть снятие отпечатков МБУ на физическом уровне с использованием технологии SDR. Кроме того, требуется исследование других типов и классов угроз на канальном уровне модели ISO/OSI, реализуемых в отношении МБУ.

Список используемых источников

1. Bluetooth 4.0/5.0 specifications. – URL: bluetooth.com/specifications (дата обращения: 02.04.2023).
2. Вишневецкий В. М., Ляхов А. И. Широкополосные беспроводные сети передачи информации. – М. : Техносфера, 2005. – 241 с.
3. Овчаров В. А. Моделирование субъектно-объектного взаимодействия в сетевых инфраструктурах // Труды СПИИРАН. – 2015. – Вып. 2. – С. 42–61.
4. Соловьев В. М. Теория вероятностей в задачах защиты информации : учеб. пособие. – СПб. : ВКА им А. Ф. Можайского, 2014. – 241 с.

И. А. Соловьев;
Н. А. Трофимова

ТЕХНОЛОГИЯ АНАЛИЗА СОБЫТИЙ И УГРОЗ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ МОДЕЛИ АКТИВНОСТИ АТАКИ К ДАННЫМ СЕТЕВОГО ТРАФИКА

В публикации представлена технология анализа событий информационной безопасности и угроз компонентам промышленных систем управления, определяющая порядок применения модели активности атаки для идентификации и последующей корреляции действий нарушителей в группы активности, характеризуемые функциональной платформой реализации. Особенностью данного решения является возможность определения состава типовых угроз по результатам анализа сетевого трафика, с последующей их приоритизацией согласно потенциалу оказывать деструктивное воздействие на целевую инфраструктуру.

Ключевые слова: промышленные системы управления, события информационной безопасности, анализ сетевого трафика, модель активности атаки, группы активности, функциональная платформа нарушителя, типовые угрозы безопасности.

ВВЕДЕНИЕ

Решающее значение для обеспечения безопасности функционирования объектов критической информационной инфраструктуры государства имеет защита промышленных автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) с учетом высокой вероятности реализации воздействия на компоненты и выполняемые процедуры их рабочего цикла в случае нарушения кибербезопасности. Из-за масштабов и сложности таких систем значительно увеличивается поверхность атаки, поэтому приоритизация актуальных для них угроз является серьезной проблемой при развертывании средств мониторинга с целью сбора сведений и информировании профильных специалистов об идентифицированных событиях информационной безопасности (ИБ).

В частности это обусловлено фактом соответствия промышленных систем управления эталонной архитектуре Purdue [1], отражающей построение технологической и административной сетей предприятия, а также использование платформ операционных и информационных технологий (ОТ- и ИТ-платформ) на различных уровнях их функционирования. Физические устройства (сенсоры, датчики (*DCS*), исполнительные механизмы технологического процесса) и программируемые логические контроллеры (*PLC*), работающие под управлением *SCADA*-систем операционного контроля, составляя на нижних уровнях архитектуры компоненты ОТ-платформ, являются целевыми объектами реализации нарушителем сценариев «сбой оборудования» либо «получение контроля над оборудованием». Компоненты ИТ-платформ уровня управления операциями производственного цикла (рабочие станции операторов, серверы хранения документируемых технологических данных, приложений контроля хода выполнения производственных процессов внутрицеховых линий, обновлений программного обеспечения, ввода-вывода данных, контроллеры домена, серверы удаленного доступа и т. д.), взаимодействующие непосредственно с ОТ-платформами через интерфейс человеко-машинного взаимодействия (*HMI*), а также уровня корпоративной сети предприятия (*ERP*-системы управления производством и вся остальная инфраструктура) с организацией доступа в сети общего пользования представляют из себя «ИТ-канал» возможного деструктивного воздействия на конечное оборудование операционных систем.

Следовательно, анализ угроз АСУ ТП должен производиться с учетом полного жизненного цикла проведения целевой атаки на компоненты инфраструктуры, входящие как в состав используемых ОТ-, так и ИТ-платформ. При этом определение характерных для типовых угроз АСУ ТП взаимосвязей событий ИБ является задачей, которая требует исследования параметров безопасности и данных сетевого взаимодействия элементов инфраструктуры по значительному множеству проприетарных и стандартизированных протоколов, а системы мониторинга сетевого трафика предлагают к анализу объективно большой объем данных, что затрудняет получение действенной информации при построении специфичных профилей угроз для конкретной среды функционирования системы управления. В настоящее время автоматизированные инструменты мониторинга и анализа сетевого трафика не в полной мере удовлетворяют перечисленным требованиям.

В этой связи актуальной задачей является разработка технологии синтеза технических показателей типовых угроз промышленных систем управления с применением предложенной в [2] модели активности атаки, представляющей собой структуру функционально зависимых элементов описания события ИБ, на основе которой осуществляется корреляция разнородных данных безопасности. Это позволит на отраслевом уровне взаимодействовать со смежными организациями (предприятиями), эксплуатирующими АСУ ТП на объектах критически важной инфраструктуры, для выработки совместных мер противодействия нарушителям в общем пространстве угроз.

ПОДХОД К АНАЛИЗУ СОБЫТИЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И УГРОЗ СЕТЕВОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

В работе [2] авторами была представлена модель активности атаки, имеющая в своей основе атомарный элемент процесса ее реализации – *событие*, определяемое как дискретное по времени (*Timestamp*) направленное (*Direction*) действие, ограниченное определенной фазой (*Phase*), когда нарушитель, используя внешние ресурсы (*Resources*) в качестве инфраструктуры, реализует инструменты и методы (*Methodology*) их применения в качестве возможности воздействия на жертву с заданным результатом (*Result*). Существуют нарушители, обладающие ресурсами и возможностями поддерживать присутствие в скомпрометированных хостах и сетях в течение продолжительного периода времени. Эта длительная активность может происходить в отношении одной или нескольких жертв и включать в себя преодоление мер по противодействию.

Для описания структуры события ИБ в модели активности атаки используется неориентированный (полный) граф, организованный в виде ромба, вершинами которого являются базовые характеристики события (сущности – нарушитель, жертва, инфраструктура и возможности). Ребра графа идентифицируют отношения между сущностями и определяют возможность последовательного выявления связанных характеристик в процессе анализа события (рис. 1). Кроме набора базовых характеристик в модели определена сущность, характеризующая технологический аспект события – функциональная платформа нарушителя. При этом метафункциями события являются, например, временные метки, фаза, результат выполнения и др., а каждая из его базовых характеристик может быть дополнительно уточнена с помощью подфункций. Их состав может быть расширен в соответствии с задачей проводимого анализа, а значения аргументов позволяют содержать специфичные сведения в отношении конкретной среды функционирования системы и связывать на их основе различные аспекты процедуры реализации атаки.

Таким образом, в целях уточнения конкретной характеристики и сбора знаний для последующего выявления корреляции событий ИБ каждый из базовых элементов может быть детализирован иерархией вложенных кортежей данных (признаков, характеризующих сущность в событии и адаптированных к проводимому анализу). Важно отметить, что каждый

элемент кортежа образует упорядоченную пару с некоторым уровнем достоверности, что позволяет использовать данную модель для разработки и применения аналитических методов.

Для последовательного сбора сведений и заполнения структуры модели данными применяется метод аналитического вращения, т. е. извлечения элемента кортежа одной из вершин (фиксирование центральности конкретного признака события в анализе графа) и его использования в сочетании с доступными источниками данных для обнаружения связанных элементов в кортежах других вершин (свидетельств, доказательств, повышающих уровень достоверности событий). Успех поворота (переход от одной вершины графа к другой) зависит от нахождения взаимосвязи между элементами событий в результате анализа всей совокупности данных и определяет соответствующий уровень достоверности полученных сведений.

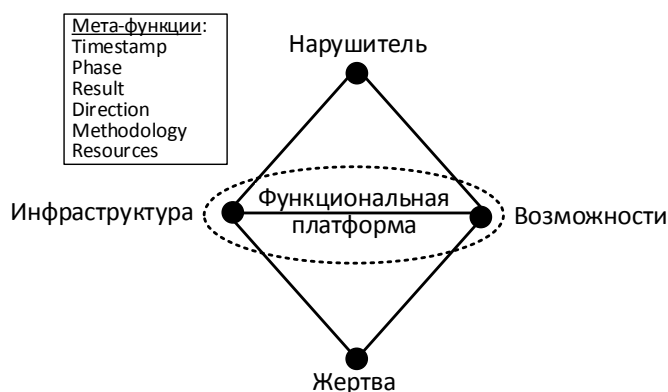


Рис. 1. Графическое представление события ИБ на основе взаимосвязанных базовых характеристик

В модели используется *аналитический поворот*, представляющий собой процесс, который позволяет специалисту ИБ получать недостающую информацию о событиях путем объединения известных («видимых») аналитику сведений с данными доступных источников по мере выявления взаимосвязей между ними. При этом отношения между базовыми характеристиками события (ребра графа) в рамках указанного процесса определяют направление проводимой аналитической работы, а элементы кортежей – точки ее приложения. Таким образом, базовые характеристики в совокупности с детализирующими их элементами кортежа (признаками) и отношения между ними обеспечивают применение к исследованию событий ИБ различных подходов, ориентированных на центральность в анализе выбранного признака, что дает возможность использовать существующие (разрабатывать новые) аналитические методы (способы) определения недостающих данных и связывания событий.

Также основанные на модели аналитические инструменты позволяют выявлять общие черты между событиями ИБ в рамках процесса их горизонтальной корреляции и определять *группу активности* как набор событий, связанных сходством в их особенностях и взвешенных по степени достоверности. Объединение событий по принципу подобия функциональной платформы субъекта угрозы (ребро графа «возможность – инфраструктура»), дает возможность обобщать сведения об особенностях его действий и на этой основе формировать набор типовых угроз без учета атрибуции нарушителя. В этом случае группы предоставляют больше агрегированных знаний об такой активности субъекта угрозы, чем первоначально смоделированная структура данных для отдельных событий ИБ.

Создание и анализ групп активности для объединения многочисленных событий ИБ по определенному аналитиком вектору признаков позволяет «понимать» последствия скоррелированных вредоносных действий и выявлять исходящую от них угрозу. Набор установленных групп активности определяет состав типовых угроз рассматриваемой сетевой инфраструктуре, которые идентифицируются в соответствии с их отличительными

признаками. Последующая приоритизация таких угроз, с точки зрения их потенциала оказывать соответствующее воздействие на компоненты целевой инфраструктуры, определяет направленность упреждающего снижения рисков за счет принятия необходимых мер своевременного реагирования и (или) защиты.

По результатам описания рассмотренной модели введем перечень обозначений используемых величин, переменных и функций, представленный в табл. 1.

Таблица 1

Перечень обозначений величин, переменных и функций модели активности атаки

Обозначение	Описание
<i>Adv</i>	Нарушитель: предполагаемый субъект реализации угрозы, участвующий в событии
<i>AGC</i>	Функция создания группы активности, реализующая алгоритм кластеризации событий
<i>AGS</i>	Множество всех групп активности пространства событий
<i>C_x</i>	Уровень достоверности элемента <i>x</i> , используемый в качестве весового коэффициента
<i>Cap</i>	Возможности: инструменты, методы, тактики и процедуры, используемые нарушителем
<i>E</i>	Событие: набор связанных базовых характеристик (нарушитель, возможности, инфраструктура и жертва)
<i>ET</i>	Множество всех идентифицированных событий с использованием исходного набора данных
<i>FV_{PR}</i>	Вектор признаков, удовлетворяющий аналитической задаче
<i>ICS</i>	АСУ ТП: автоматизированная система управления технологическими процессами (<i>Industrial Control System</i>)
<i>Inf</i>	Инфраструктура: виртуальные и физические ресурсы, используемые для обеспечения действий нарушителя
<i>PR</i>	Аналитическая задача
<i>Vic</i>	Жертва: организация или объект, на которые нацелен нарушитель при инициализации события

Таким образом, структура модели характеризует события ИБ с точки зрения нескольких измерений, каждое из которых имеет базовые точки описания, а используемые аналитические инструменты выявляют в сформированном наборе данных связи между событиями для построения профилей типовых угроз организации, идентифицируемых функциональной платформой нарушителя.

Для решения поставленной задачи в структуре модели будем использовать следующие конструкции: сущности – базовые элементы сетевых событий ИБ, свойства сущностей – кортежи их признаков, отношения в структуре модели – функциональные платформы нарушителей и группы активности. Ориентированные на представленную модель данные будут заполняться на основе мониторинга сетевого трафика и анализа дополнительных сведений из общедоступных источников. Основным исходным набором данных являются результаты осуществления полного захвата сетевых пакетов, циркулирующих в инфраструктуре АСУ ТП организации (файлы *PCAP*). Сенсоры в рассматриваемой сетевой среде предоставляют весь входящий и исходящий трафик в формате *standard libpcap*, используемом такими приложениями, как *Tcpdump* и *Wireshark*. Такой набор данных содержит трафик от уникальных узлов, взаимодействующих по протоколам *TCP*, *UDP* и *ICMP*, который достаточно велик и обеспечивает необходимый объем сведений для анализа событий ИБ, но

в большинстве случаев не имеет контекста определенной активности. Контекст события ИБ заполняется путем интеграции данных из открытых источников (*WHOIS*, *DNS*, *Virus Total* и др.), а также сведений поставщиков оборудования АСУ ТП.

ПОРЯДОК ПРИМЕНЕНИЯ МОДЕЛИ АКТИВНОСТИ АТАКИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ АНАЛИЗА СЕТЕВОГО ТРАФИКА И ТИПИЗАЦИИ УГРОЗ АСУ ТП

С целью идентификации и типизации угроз компонентам инфраструктуры АСУ ТП применима модель активности атаки для интерпретации и использования данных *PCAP*, а также внешних источников при описании характеристик выявленных событий ИБ и связывания действий реализации угрозы по их функциональным признакам.

Аналитический поворот, используемый в модели активности атаки, являясь основным инструментом исследования наблюдаемых в трафике событий ИБ, осуществляется относительно таких вершин «ромба», как «жертва», «инфраструктура» и «возможности», исключая вершину «нарушитель», т. е. без учета его атрибуции. Такое применение поворота формирует сведения в описаниях событий, характеризующие технологический аспект реализации угрозы ИБ обезличенным нарушителем. Это дает возможность объединять события по принципу подобия функциональных платформ субъектов угроз (без необходимости совпадения по точным признакам, например, одна и та же используемая нарушителем инфраструктура или возможность осуществления направленного воздействия) путем создания групп активности. При этом в сведения описания событий интегрируются данные внешних источников таким образом, чтобы обеспечить получение контекстных индикаторов угроз АСУ ТП, которые являются материалом для построения вектора признаков функции группирования событий.

Конечной целью проводимого анализа является формирование перечня типовых угроз АСУ ТП на множестве событий ИБ (*ET*), взвешенных по уровню достоверности (C_X), путем решения аналитической задачи (*PR*) объединения их в группы активности (*AG*) функцией кластеризации (*AGC*) на основе удовлетворяющего этой задаче вектора признаков (FV_{PR}), определяющего критерии корреляции. Сформированные группы активности, ассоциированные с применяемой функциональной платформой нарушителя, используются для идентификации типовых угроз сетевой инфраструктуре АСУ ТП.

Исходя из представленного аналитического инструментария требуется с учетом специфики среды функционирования и сетевого взаимодействия элементов инфраструктуры АСУ ТП осуществить нижеприведенным порядком работу по определению состава элементов кортежей вершин графа описания события ИБ в среде *ICS*. Затем, за счет применения аналитических поворотов, ориентированных на выбранные в контексте проводимого анализа элементы кортежей, получить необходимую информацию для идентификации и корреляции событий ИБ, выполнить формирование групп активности, характеризующих функциональной платформой нарушителя, и осуществить заполнение соответствующего вектора признаков группы. Далее, в результате исследования полученных групп определить типовые угрозы компонентам *ICS*.

1. Определение элементов кортежей описания события ИБ для компонентов АСУ ТП.

Представим событие *E* как множество, элементами которого являются неотъемлемые базовые характеристики события (нарушитель (*Adv*), возможности (*Cap*), инфраструктура (*Inf*) и жертва (*Vic*)) в совокупности с весовым коэффициентом (C_X), определяющим уровень достоверности аналитического заключения и (или) точностью источника данных относительно элемента *x*, следующим образом:

$$E = \langle\langle Adv, C_A \rangle, \langle Cap, C_C \rangle, \langle Inf, C_I \rangle, \langle Vic, C_V \rangle\rangle.$$

Чтобы правильно использовать модель при решении поставленной в отношении технологической области ICS аналитической задачи, необходимо определить наборы характерных признаков сущностей события, для чего каждый из базовых элементов множества E расширен (детализирован) иерархией вложенных кортежей (подфункций, адаптированных к проводимому анализу). При этом элементы вложенных кортежей подчинены общему правилу их объединения с соответствующим уровнем достоверности.

В контексте проводимого анализа характеризующий обезличенного нарушителя Adv кортеж представляет собой пустое множество:

$$\langle Adv, C_A \rangle = \langle \emptyset \rangle.$$

Детализация базовой характеристики Cap задает особенности, подчеркивающие расширяемость модели и, в свою очередь, ее полезность в качестве инструмента анализа безопасности специализированных сетей. Представим состав характерных признаков, учитывающих возможности нарушителя, как использование сканирования портов, эксплойтов, ВПО, канала $C2$, а также осведомленность нарушителя о специфике ICS в виде соответствующего кортежа:

$$\langle Cap, C_C \rangle = \langle \langle PortScan, C_{PS} \rangle, \langle Exploit, C_{Ex} \rangle, \langle Malware, C_M \rangle, \langle C2, C_{C2} \rangle, \langle ICS, C_{ICS} \rangle \rangle.$$

Первые четыре элемента кортежа Cap применимы ко многим киберугрозам, а не только к тем, которые нацелены на ICS, так как возможности, реализуемые нарушителем против сетей АСУ ТП, значительно совпадают с возможностями, реализуемыми против ИТ-сетей.

В силу специфики использования на различных уровнях построения АСУ ТП платформ информационных и операционных технологий [1] в кортеж включается элемент ICS , показывающий очевидную способность нарушителя различать ОТ-сети и воздействовать на них, следуя двухэтапному подходу к реализации атаки – компрометация ИТ-сети для последующей компрометации ОТ-сети [3]. Оценить эту способность позволяет такой показатель, как сканирование портов, специфичных для ICS, или же использование эксплойтов и ВПО, нацеленных на систему управления.

Переходя к базовой характеристике Inf , определим элементы соответствующего кортежа, как характеризующие ресурсы, используемые нарушителем, в том числе с расширенными возможностями. Эти ресурсы включают IP-адрес, порт источника, операционную систему, имя домена или хоста, тип хостинга и использование прокси-сервера:

$$\langle Inf, C_I \rangle = \langle \langle IP, C_{IP} \rangle, \langle Port, C_P \rangle, \langle OS, C_{OS} \rangle, \langle Domain, C_D \rangle, \langle HostType, C_{HT} \rangle, \langle Proxy, C_{Px} \rangle \rangle.$$

Эти сведения описывают основные атрибуты ресурсов, используемых нарушителем. В некоторых аналитических системах инфраструктура может также включать физические активы, используемые субъектом, реализующим угрозу. Это, безусловно, будет иметь отношение к анализу угроз ICS. Например, нарушитель, которому удастся проникнуть в помещения организации, может установить скомпрометированное оборудование или программное обеспечение АСУ ТП. Однако установление фактов таких действий нарушителя, очевидно, не входит в рамки текущего анализа трафика.

В то время как большинство задач по описанию инфраструктуры нарушителя относительно просты, определение используемого им типа хостинга следует основывать на уточнении в работе [2] того, что существует два основных типа инфраструктуры: тип 1 «полностью контролируется или принадлежит нарушителю», в то время как инфраструктура типа 2 поддерживается третьей стороной (независимо от того, законно ли она приобретена или скомпрометирована нарушителем).

В отличие от детализации знаний о нарушителе, мы имеем значительный объем данных о базовой характеристике *Vic*. Вся целевая инфраструктура определена и представляет собой кортеж известных констант, которые обеспечивают выбор отправных точек проведения анализа. Следовательно, представим «жертву» в терминах организации, целевого IP-адреса, целевого порта и целевой системы:

$$\langle Vic, C_V \rangle = \langle \langle Org, C_O \rangle, \langle TargetIP, C_{ТИР} \rangle, \langle TargetPort, C_{ТП} \rangle, \langle System, C_S \rangle \rangle.$$

Эти сведения являются стандартными дескрипторами организации, на которую нацелены нарушители. Первый элемент *Org* является фиксированным, поскольку все целевые хосты, управляются одной организацией. Значения остальных трех элементов (*TargetIP*, *TargetPort* и *System*) имеются в данных PCAP.

2. Заполнение элементов описания и связывание событий аналитическим поворотом.

После детализации описания (свойств) базовых характеристик мы извлекаем из трафика полезные данные о событиях ИБ и в совокупности со сведениями внешних источников производим нахождение связанных элементов их кортежей путем применения аналитических поворотов. При рассмотрении такого набора данных большого объема важно иметь методы быстрого связывания (корреляции) событий. Для этого, авторами предлагается использовать следующие методы применения аналитических поворотов, ориентированные на определенные отправные точки их осуществления при идентификации действенных данных о событиях.

Хост-ориентированный метод реализуется аналитическим поворотом от известного целевого хоста (или набора хостов, предположительно имеющих корреляцию) и ищет связь в данных описания событий на 3-м уровне иерархии кортежа жертвы (*TargetIP*), таких как IP-адрес и имя хоста. Порт-ориентированный метод сосредоточен на исследовании данных уровня 4 (*TargetPort*), поэтому аналитический поворот осуществляется от групп целевых номеров портов TCP и UDP, чтобы определить действия нарушителя по подготовке атаки (разведке).

Метод, ориентированный на хост, фокусируется на поиске отношений между внешними хостами (синергетическими союзниками) путем изучения шаблонов или особенностей трафика (например, характеризующих трафик, который предположительно связан с ВПО или каналом C2) и потенциально дает значительные данные по взаимосвязи «возможности – инфраструктура» (функциональной платформе нарушителя). Данный метод является одним из наиболее эффективных подходов к аналитическому повороту, так как обеспечивает отправную точку для характеристики событий угроз, что помогает систематизировать внешние хосты по их деятельности (очевидное поведение этих хостов в отношении сетевых взаимодействий) и устанавливать ассоциации между ними с большим уровнем достоверности, чем объединять хосты субъектов угроз общей инфраструктурой.

В качестве примера на рис. 2 представлен цикл аналитических поворотов, начинающийся с низкодостоверных данных об использовании ВПО и канала C2 на хосте жертвы. Поворот 1 от жертвы к возможностям: запрос POST с длинным закодированным универсальным кодом ресурса (URI) и нетипичным именем хоста в заголовке HTTP POST предполагает, что это может быть вредоносный трафик. Поворот 2 от возможностей к инфраструктуре: поиск домена на *VirusTotal* выявляет его возможную связь с внешним хостом. Поворот 3 к дальнейшему исследованию инфраструктуры: сервисы *RobTex* и *DomainTools* обеспечивают перекрестные ссылки между различными базами данных DNS, номерами автономных систем (ASN) и черным списком для многих хостов и выявляют дополнительные хосты инфраструктуры нарушителя. Поворот 4 от инфраструктуры к жертве: исследование потенциально вредоносного трафика C2 выявляет зашифрованные соединения с другими хостами жертвы через *Secure Sockets Layer / Transport Layer Security (SSL/TLS)*.

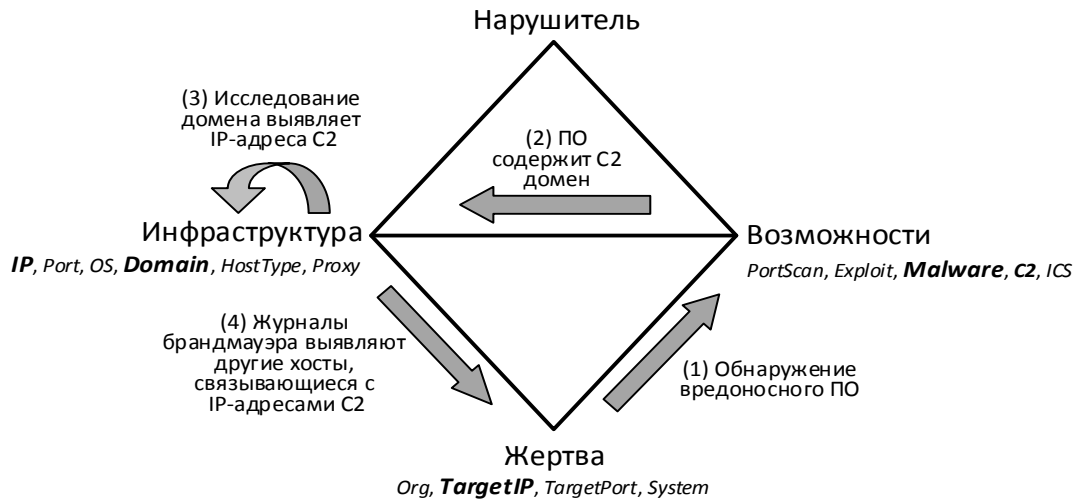


Рис. 2. Пример осуществления цикла аналитических поворотов при реализации хост-ориентированного метода анализа связи событий ИБ

Когда не хватает достаточной информации для проведения анализа методом, ориентированным на хост, можно использовать отношения между портами в качестве отправной точки для осуществления аналитических поворотов с целью идентификации внешних хостов, которые могут пытаться наблюдать или эксплуатировать устройства *ICS*. В этом случае метод, ориентированный на порт, целесообразен к применению для ОТ-сети, где часто содержатся устройства, которые обмениваются данными по специализированным портам, редко используемым другими службами (например, порт 20000 используется в основном для *DNP* – общего протокола, используемого в *SCADA networks*). Следовательно, выполнение аналитического поворота данным методом позволяет определять возможности нарушителя с точки зрения его осведомленности об *ICS*.

Таким образом, элемент данных в кортеже одной из сущностей события, используемый для фиксации отправной точки анализа и поворота к элементу другой сущности, с учетом его видимости, является информационной ссылкой на элементы в кортежах описания связанных событий.

В результате, при проведении указанными методами необходимого количества циклов аналитических поворотов в отношении заданных с учетом специфики *ICS* элементов кортежей событий ИБ, на установленном уровне достоверности формируется их описание, содержащее контекстные индикаторы действий нарушителя по реализации атаки на компоненты ОТ-сети. Полученные индикаторы позволяют выявлять общие признаки угроз целевой сети на пространстве всех идентифицированных в трафике событий ИБ (множество *ET*).

Данный шаг применения модели активности атаки выполняет пред- и постобработку событий ИБ с точки зрения множеств входных и выходных данных (*multiple information sources*), связываемых аналитическим поворотом таким образом, что несколько событий могут образовывать более сложную конструкцию описания активности субъекта угрозы. Такая конструкция при дальнейшем анализе будет восприниматься как неделимая.

3. Определение групп активности субъектов реализации угроз компонентам АСУ ТП.

Целью проводимого анализа является определение групп активности субъектов реализации угроз на основе их потенциала оказывать направленное воздействие на компоненты ОТ-сети. Исходя из этого, аналитической задачей *PR* является формирование на множестве *ET* набора групп событий ИБ, основанных на сходстве функциональной платформы реализации атаки на компоненты *ICS* различными субъектами угроз. Такая горизонтальная корреляция событий ИБ дает возможность обобщать сведения о типовых угрозах целевой среде.

Тип используемой корреляции и алгоритм реализации процесса объединения событий определяет функция группировки. Для поставленной аналитической задачи сравнение событий осуществляется по нацеленности субъектов угрозы на инфраструктуру *ICS* и типу используемой нарушителями функциональной платформы, без определения их атрибуции. Реализация процесса группирования определяется следующими условиями: все события множества *ET* должны быть рассмотрены на основе их сходства (подобия, *similarity based*), при этом каждое из событий может быть отнесено только в одну группу, либо определено как несгруппированное.

Так как моделью активности атаки предусматривается корреляция и группировка идентифицированных событий ИБ на основе сходства в их контекстных индикаторах, то из них необходимо выбрать элементы, формирующие вектор признаков FV_{PR} , таким образом, чтобы он наиболее соответствовал решению аналитической задачи *PR*.

Тогда зададим функцию создания группы активности *AGC* в терминах трех взаимозависимых переменных – аналитической задачи *PR*, вектора признаков FV_{PR} , согласуемого с рассматриваемой аналитической задачей, и множества идентифицированных событий *ET*:

$$AGC(PR, FV_{PR}, ET) \rightarrow AGS,$$

где $AGS = \{AG_1, AG_2, \dots, AG_n\}$ – набор всех определяемых на пространстве *ET* групп активности, составляющих события ИБ, имеющие одно или несколько сходств, удовлетворяющих используемой для отнесения событий в группы функции *AGC*.

В контексте процесса группирования событий ИБ в рамках АСУ ТП по наличию субъектов реализации угроз, чьи действия демонстрируют нацеленность на инфраструктуру ОТ-сети (в отличие от тех, кто занимается аналогичной деятельностью без явного интереса к такой инфраструктуре), наиболее значимым признаком из кортежа *Cap* является элемент *ICS*.

В контексте процесса группирования событий ИБ по наборам наблюдаемых возможностей субъектов угроз основным признаком, определяющим *AG*, является использование нарушителем одной или нескольких возможностей по реализации *C2*, ВПО, эксплойтов или сканирования портов. Цепочка элементов этого признака (*C2*, *Malware*, *Exploit*, *PortScan*) позволяет сортировать события по степени важности в определении критичности угрозы, поскольку они в порядке убывания соответствуют последовательности реализации фаз проведения сетевых атак, иначе – цепочке *Kill Chain*. Это означает, что субъект, установивший *C2*, представляет более высокую угрозу, чем тот, который просто занимается сканированием портов.

Хотя эти два класса признаков из кортежа *Cap* обеспечивают четкое описание потенциала угрозы, мы можем дополнительно «прояснить» ее с помощью определенных признаков из кортежа *Inf*. Здесь IP-адрес (*IP*) и домен (*Domain*) особенно актуальны, потому что они прямо указывают на инфраструктуру, используемую субъектами угроз. Эти сведения в совокупности с признаками возможностей нарушителя идентифицируют *AG* по соответствующей функциональной платформе.

Тогда, используя вышеприведенную нотацию для заданной аналитической задачи, вектор признаков определяется следующим образом:

$$FV_{PR} = \langle ICS, \{C2 \vee Malware \vee Exploit \vee PortScan\}, IP, Domain \rangle.$$

Следовательно два или более событий будут коррелированы в одной группе активности, например, если в них содержатся сведения по совместному использованию IP-адреса(ов) инфраструктуры, возможности установки канала *C2* и сосредоточенности на *ICS*.

Таким образом, группы активности, содержащие события с наиболее полным набором общих характеристик из вектора признаков, обеспечивают ключевые индикаторы активности атаки, необходимые при расстановке приоритетов в процессе принятия решений по нейтрализации реализуемых угроз целевой инфраструктуре.

ПРИОРИТИЗАЦИЯ ТИПОВЫХ УГРОЗ АСУ ТП ПО СТЕПЕНИ ИХ КРИТИЧНОСТИ

Когда осуществлено построение вектора признаков, используемого в функции *AGC*, мы можем предоставить сформированное на общем пространстве выявленных событий ИБ множество *AGS* групп событий ИБ, основанных на сходстве функциональной платформы реализации атаки на компоненты *ICS* различными субъектами угроз (аналитическая задача *PR*). Общий принцип формирования групп событий ИБ, которые должным образом представляют угрозы, исходящие от субъектов активности атаки, согласуется с конечной целью проводимого анализа, заключающейся в определении порядка приоритизации типовых угроз целевой АСУ ТП.

Критериями приоритизации типовых угроз по степени их критичности являются подтвержденный факт компрометации целевой инфраструктуры нарушителем, либо потенциальный риск от проводимых им действий в отношении ее компонентов. Предлагаемая расстановка приоритетов по указанным критериям представлена ниже.

1. Определим *критичных* субъектов угроз как нарушителей, чьи действия обеспечивают высокую степень уверенности в том, что они реализовали активную фазу атаки на сеть. Чтобы попасть в эту категорию, субъект угрозы должен продемонстрировать доставку ВПО или установку канала *C2*. Это может быть не связано с фокусом на технологическую область *ICS*, хотя такая атака, ориентированная на ее компоненты, представляет собой наиболее критичный тип событий.

2. Субъекты *высокого риска* рассматриваются в контексте их способности оказывать неблагоприятное воздействие на целевую сеть. Это может быть связано с активными попытками реализации угроз нарушителями, которые демонстрируют либо интерес к *ICS*, либо «знакомство» с сетевой работой жертвы (например, специализированный эксплойт). Рекогносцировка также может представлять высокий уровень риска, так как этот тип сетевой активности может являться ранней стадией фактической атаки. Если такое целевое сканирование портов действительно является вредоносным, оно предоставляет специалистам по реагированию на инциденты информацию о нарушителях, которые осведомлены в области *ICS*, обладают способностью осуществлять действия по идентификации целевых устройств и определять, какие устройства в среде могут отвечать за управление процессом.

3. Субъекты *умеренного риска* – это большая часть хостов, которые активно участвуют в сканировании портов. К этой категории также относятся остальные субъекты, занимающиеся автоматизированными попытками эксплуатации известных уязвимостей или массово отправляющие трафик, связанный с распространенными эксплойтами (многочисленные ботнеты и другие вредоносные хосты, участвующие в постоянных попытках скомпрометировать объекты эксплуатации без актуальных обновлений), так как они не представляют существенной угрозы для подавляющего большинства организаций (предприятий) с соответствующими базовыми мерами безопасности.

В этой связи следует отметить, что отнесение угрозы в соответствующей группе событий к наиболее критичному уровню риска осуществляется только на основе выявления факта нацеленности субъекта на компоненты ОТ-сети, который отражается унарным контекстным индикатором *ICS*. Это диктует необходимость контекстуализации описания событий ИБ, проявляющихся на нижних уровнях архитектуры *Purdue*, и связывания их в рамках всего жизненного цикла целенаправленной атаки.

Следовательно, для обеспечения более полной детализации активности нарушителя в отношении компонентов инфраструктуры ОТ-сети требуется расширить состав элементов кортежей *Cap*, *Inf* и переопределить вектор признаков с целью получения дополнительных индикаторов, характеризующих используемые субъектом реализации угрозы специфичные для технологической области *ICS* методы, тактики, техники и процедуры. На данный мо-

мент матрица сведений о таких действиях нарушителей предоставляется внешним источником [3] как результат реализации проекта *MITRE ATT&CK for Industrial Control Systems: Design and Philosophy*.

ПРАКТИКА ПРИМЕНЕНИЯ РАССМАТРИВАЕМОГО АНАЛИТИЧЕСКОГО АППАРАТА В ЗАДАЧЕ АНАЛИЗА СОБЫТИЙ И УГРОЗ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АСУ ТП ПО ДАННЫМ СЕТЕВОГО ТРАФИКА

Для примера использованы представленные в работе [4] результаты применения рассматриваемого аналитического аппарата для анализа данных файлов *PCAP*, полученных в процессе функционирования сетевой работы *ICS* неназванной международной энергетической компании, эмулированной в рамках технологии *Honeynet*. В техническом отчете о проведенном исследовании идентифицированы в данных трафика и охарактеризованы субъекты угроз рассматриваемой сети на основании выявленных нижеследующих групп активности.

AG1: причина группировки – высокая достоверность идентификации вредоносного трафика *C2*, установлен перечень контекстных индикаторов субъекта угрозы – *IP, TargetPort, Domain, Malware, C2, HostType*.

AG2: причина группировки – сфокусированное сканирование известных портов *ICS*, установлен перечень контекстных индикаторов субъекта угрозы – *IP, TargetPort, Domain, ICS, PortScan*.

AG3: причина группировки – расширенное сканирование распространенных TCP-портов, установлен перечень контекстных индикаторов субъекта угрозы – *IP, Port, TargetPort, PortScan*.

AG4: причина группировки – автоматизированное сканирование уязвимостей / попытка доступа, нацеленная на веб-серверы *Apache*, попытка применения эксплойта *Shellshock* (CVE-2014-6271 и т.д.), установлен перечень контекстных индикаторов субъекта угрозы – *IP, TargetPort, Exploit, Malware*.

AG5: причина группировки – автоматизированные попытки обнаружения уязвимости *TheMoon* (CVE-2013-5122) в устройствах *Linksys*, установлен перечень контекстных индикаторов субъекта угрозы – *IP, TargetPort, PortScan, Exploit*.

AG6: причина группировки – автоматизированные попытки эксплуатации уязвимостей CVE-2012-1823, CVE-2012-2311, CVE-2012-2336 на PHP, установлен перечень контекстных индикаторов субъекта угрозы – *IP, TargetPort, PortScan, Exploit*.

На рис. 3 представлен процесс формирования множества групп активности *AGS* посредством применения к событиям ИБ функции *AGC* с заданным вектором признаков *FV_{PR}* для решения аналитической задачи *PR*.

Отчет об идентификации типовых угроз в рассматриваемом фрагменте трафика и их приоритизации по степени критичности приведены в табл. 2.

Представленные результаты исследования в конечном итоге раскрывают возможности нарушителя в ограниченной степени и в явном виде не указывают на потенциал угрозы, в частности, для сложных (распределенных) атак. Это обусловлено использованием в качестве исходных данных только фрагмента трафика, что не позволило выявить достаточных доказательств для связывания части событий в группы активности, характеризующие других потенциальных субъектов угроз. Кроме того, несгруппированные события, являясь трафиком «неизвестного риска», подпадают под эту категорию из-за отсутствия данных о событиях для конкретного узла, порта или приложения, а также из-за невозможности надежно связать такие события с другими в наборе *ET*. Это не означает исключение несгруппированных событий из рассмотрения, а требует их исследования при обеспечении доступности большего объема данных в рамках дальнейшего анализа.

Аналитическая задача, *PR*:
сформировать на множестве *ET* группы событий на основе сходства функциональной платформы реализации атаки на компоненты ICS различными субъектами угроз согласно вектору признаков *FV_{PR}*

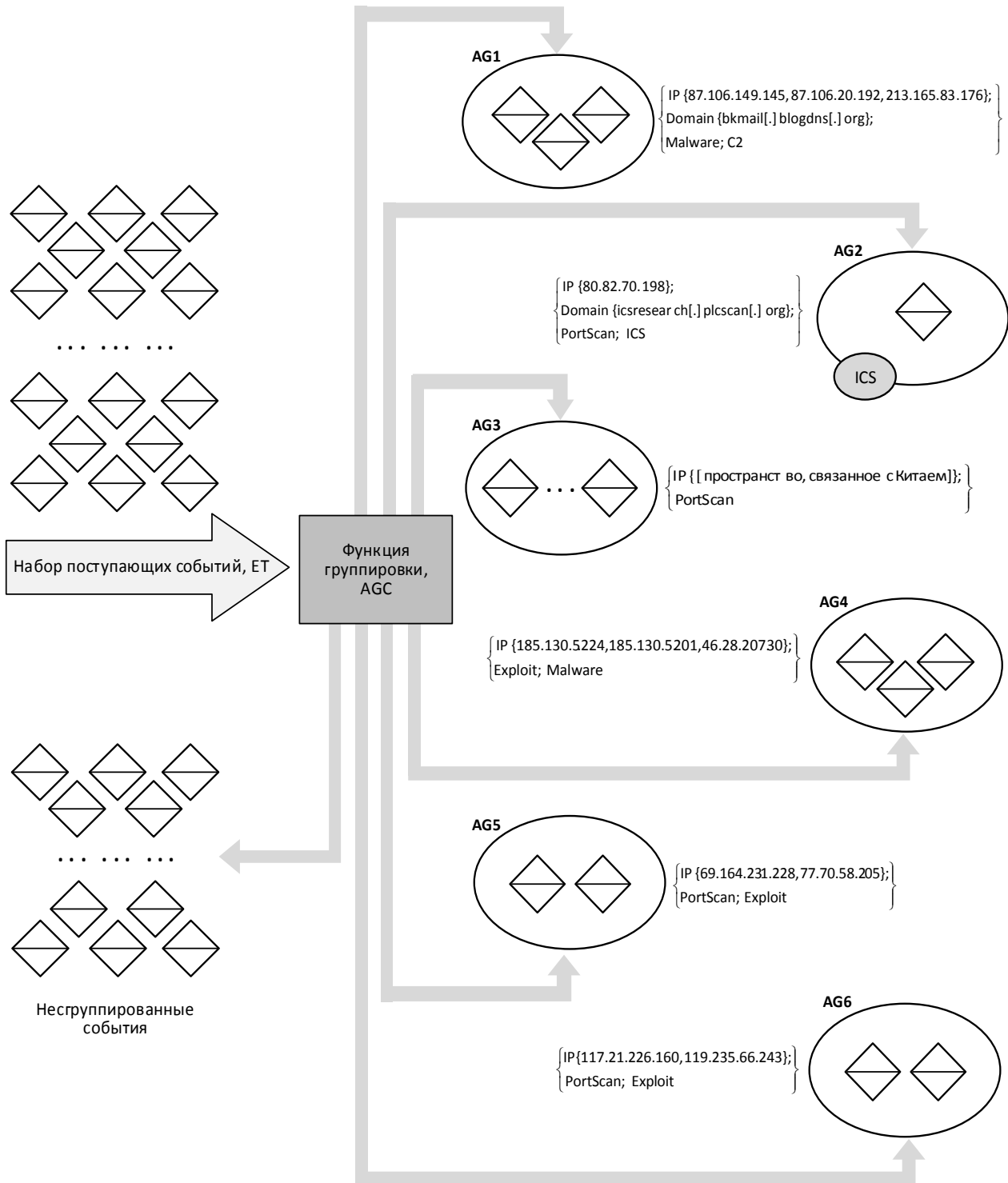


Рис. 3. Процесс решения задачи *PR* по формированию множества *AGS* посредством применения функции *AGC* с заданным вектором признаков *FV_{PR}* относительно фрагмента трафика

Таблица 2

**Описание характеристик установленного состава типовых угроз
с приоритизацией их по степени критичности**

Тип угрозы	Профиль угрозы	Степень критичности угрозы
Доставка ВПО и установка канала C2	<i>IP</i> {87.106.149.145, 87.106.20.192, 213.165.83.176}; <i>TargetPort</i> {80, 443}; <i>Domain</i> {bkmail[.] blogdns[.] org}; <i>Malware</i> ; C2; <i>HostType</i> {тип 2}.	Критичная
Целевое сканирование ICS-портов	<i>IP</i> {80.82.70.198}; <i>TargetPort</i> {[19 распространенных портов ICS]}; <i>Domain</i> {icsresearch[.] plcscan[.] org}; <i>ICS</i> ; <i>PortScan</i> .	Высокого риска
Расширенное сканирование TCP-портов	<i>IP</i> {[адресное пространство, связанное с Китаем]}; <i>Port</i> {TCP 6000}; <i>TargetPort</i> {[перечень общих портов]}; <i>PortScan</i> .	Умеренного риска
Атака на веб-серверы <i>Apache</i> посредством эксплуатации уязвимости <i>Shellshock</i>	<i>IP</i> {185.130.5.224, 185.130.5.201, 46.28.207.30}; <i>TargetPort</i> {TCP 80, UDP 53413}; <i>Exploit</i> ; <i>Malware</i> .	
Сканирование сети на возможность эксплуатации уязвимости <i>TheMoon</i> на устройствах <i>Linksys</i>	<i>IP</i> {69.164.231.228, 77.70.58.205}; <i>TargetPort</i> {80}; <i>PortScan</i> ; <i>Exploit</i> .	
Сканирование сети на возможность эксплуатации уязвимостей CVE-2012-1823, CVE-2012-2311, CVE-2012-2336	<i>IP</i> {117.21.226.160, 119.235.66.243}; <i>TargetPort</i> {TCP 23, 80, 8081}; <i>PortScan</i> ; <i>Exploit</i> .	

Следовательно, для решения задачи PR файлы PCAP фрагмента трафика очевидно не удовлетворяют полноте данных. Поэтому, определение актуального состава типовых угроз организации необходимо осуществлять в рамках процесса корреляции, представляющего собой последовательность операций над событиями, специально заданную для получения желаемого результата и являющуюся непрерывной относительно работы рассмотренных инструментов анализа.

Таким образом, выявление длительной активности нарушителя по реализации угроз возможно в условиях постоянного мониторинга сетевого трафика, в ходе которого производится сбор полного списка возможностей и элементов инфраструктуры субъектов угроз в отношении эксплуатируемой ICS. Описания сформированных групп активности, представляющие собой профили типовых угроз, могут использоваться для разработки технологий их распознавания в поступающих в процессе мониторинга данных трафика и определения порядка дальнейшего анализа событий ИБ в условиях неполных или недоступных данных источников.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные технология и порядок применения модели активности атаки для решения задач анализа событий и угроз ИБ сетевой инфраструктуры АСУ ТП предлагают как продуктивный подход к его проведению в отношении совокупности собранных из сети ICS и внешних данных, так и понимание того, как эти данные могут быть взаимосвязаны таким образом, чтобы сделать их применимыми в качестве надежного источника информации, содержащего сведения о реализации типовых угроз. Модель обеспечивает заполнение дан-

ными элементов структуры событий ИБ в контексте *ICS* и определяет, как они работают вместе, тем самым создавая аналитическую базу для описания угроз компонентам ОТ-сетей с целью их типизации и приоритизации по степени критичности. Полученные кортежи данных с точки зрения проводимого анализа адекватно характеризуют наблюдаемые в трафике события, позволяют на основе выявленных общих признаков произвести операцию отнесения их в соответствующую группу активности, которая по установленным контекстным индикаторам атаки должным образом представляет профиль типовой угрозы рассматриваемой инфраструктуре.

Предложенный подход, использующий модель активности атаки для выполнения анализа угроз безопасности промышленных систем управления, учитывает специализированный характер этой области [1, 3] и определяет особые задачи для успешного сбора данных описания событий ИБ. Это обусловлено, в том числе, тем фактом, что в соответствии с архитектурой построения АСУ ТП на различных уровнях ее функционирования используются как ОТ-, так ИТ-платформы. Поскольку в работе, на данный момент, порядок применения модели определен только в отношении данных *PCAP* и доступных внешних источников, то повышением эффективности анализа угроз целевой инфраструктуре видится включение модели в аналитические инструменты непрерывного автоматизированного сбора данных от сетевых датчиков. Для этого должен быть определен протокол обмена контекстными индикаторами угроз АСУ ТП и на базе сформулированных решающих правил разработан интеллектуальный аппарат оперативной и реляционной интеграции в модель таких индикаторов.

Помимо этого, при получении результатов расследования актуальных инцидентов в ОТ-сетях и по мере их анализа может возникнуть необходимость в оценке, а также корректировке характеристик функциональных платформ нарушителя, используемых в рассматриваемой модели активности атаки для описания типов угроз. Например, в настоящее время понимание использования канала *C2* относительно компонентов *ICS* согласно указанным в работе причинам ограничено, но может расширяться за счет обнаружения и проверки инструментами внешних аналитических платформ более релевантных данных об этих событиях с последующим включением их в модель.

Таким образом, рассмотренная модель, реализуя принцип расширяемости описания событий ИБ и гибкость в определении функции (алгоритма) их группирования по соответствующему вектору признаков, а также лежащая в ее основе представленная технология являются действенными средствами поддержки эволюции анализа угроз АСУ ТП.

Список используемых источников

1. *Williams T.* The Purdue Enterprise Reference Architecture // 12th Triennial World Congress of the International Federation of Automatic control. – 1993. – P. 559–564.
2. *Соловьев И. А., Соловьева М. В., Трофимова Н. А.* Контроль состояния информационной безопасности на основе моделирования деструктивной деятельности нарушителя // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2021. – Вып. 677. – С. 169–179.
3. MITRE ATT&CK for Industrial Control Systems: Design and Philosophy : project № 01ADM105-OT. – March, 2020. – URL: https://attack.mitre.org/docs/ATTACK_for_IC_S_Philosophy_March_2020.pdf (дата обращения: 02.02.2023).
4. *Kotheimer J.* Using Honeynets and the Diamond Model for ICS Threat Analysis : technical Report № CMU/SEI-2016-TR-006. – Software Engineering Institute, 2016. – URL: <https://resources.sei.cmu.edu/library/asset-view.cfm?assetid=454233> (дата обращения: 02.02.2023).

А. А. Абдурахимов,
доктор технических наук, профессор;
В. В. Дуга,
кандидат технических наук;
И. О. Кукушкин,
кандидат технических наук, доцент;
М. М. Полуян,
кандидат технических наук

КОНЦЕПЦИЯ ПЕРЕБАЗИРУЕМЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К ЗАПУСКУ СВЕРХМАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

В статье обоснована целесообразность и возможность создания перебазируемых технических комплексов, входящих в состав наземных подвижных космических комплексов. Рассмотрен вопрос терминологии, определены базовые принципы создания перебазируемых технических комплексов.

Ключевые слова: сверхмалый космический аппарат, ракета-носитель сверхлегкого класса, перебазируемый технический комплекс, подвижный космический комплекс.

ВВЕДЕНИЕ

Миниатюризация целевой аппаратуры и расширение перечня задач, которые могут решаться такой аппаратурой, показывают практическую целесообразность создания сверхмалых (СМ) космических аппаратов (КА) [1]. В настоящее время успешно развиваются проекты применения КА класса *CubeSat*, создаваемых множеством разработчиков по всему миру, но в соответствии с едиными требованиями [2]. Полученный опыт позволил ряду разработчиков перейти уже к конвейерному производству КА небольших размеров и массы с упрощением системы их эксплуатации. В частности, предъявляются существенно более низкие эксплуатационные требования к наземной инфраструктуре, ракетному космическому комплексу (РКК). Например, СМ КА могут прибывать на технический комплекс (ТК) в высокой степени технической готовности, требуя лишь заряда аккумуляторных батарей и установки на переходник полезного груза. Возможна также установка еще на заводе-изготовителе сразу группы СМ КА внутри специальных многоместных пусковых контейнеров [3], которые обеспечивают дополнительную защиту от внешних эксплуатационных факторов (рис. 1).



Рис. 1. Конфигурации пусковых контейнеров для СМ КА

Для решения задач оперативного расширения возможностей действующих орбитальных группировок (ОГ) за счет СМ КА, при возникновении чрезвычайных ситуаций, либо при необходимости оперативного внепланового восполнения ОГ, например, при непредвиденном отказе нескольких КА в различных орбитальных позициях, является целесообразным применение ракет-носителей (РН) сверхлегкого класса (СЛК), проекты которых появились в последние годы в достаточном количестве [4, 5]. Такие РН в полном соответствии с характером выводимого полезного груза имеют меньшую массу и габаритные размеры по сравнению с другими классами ракет, более технологичны и просты в подготовке к пуску. При этом есть проекты РКК с РН СЛК, в состав которых входят подвижные пусковые установки (ППУ).

Использование подвижных пусковых установок позволяет гибко изменять место пуска ракет космического назначения и, соответственно, реагировать на возможные чрезвычайные ситуации, в том числе с использованием наземной инфраструктурой существующих космодромов.

АНАЛИЗ ОПЫТА ЭКСПЛУАТАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ БАЗИРОВАНИЯ С ПОДВИЖНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

В нормативных документах по космической технике [6] введен термин «подвижный космический комплекс» и определено, что это космический комплекс (КК), оснащенный подвижной пусковой установкой. В свою очередь, подвижная пусковая установка ракеты космического назначения (ППУ РКН) – это пусковая установка, смонтированная на наземном, морском или авиационном транспортном средстве. Отметим, что в [6] даны определения авиационного космического комплекса (АКК) и морского космического комплекса (МКК), однако нет отдельного определения для наземного подвижного космического комплекса (НПКК).

В практике мировой и отечественной космонавтики есть успешные примеры космических комплексов, в состав которых входят средства выведения различных видов базирования. Все три указанные выше направления развития подвижных КК представлены как действующими комплексами, так и комплексами, эксплуатация которых завершена (рис. 2).

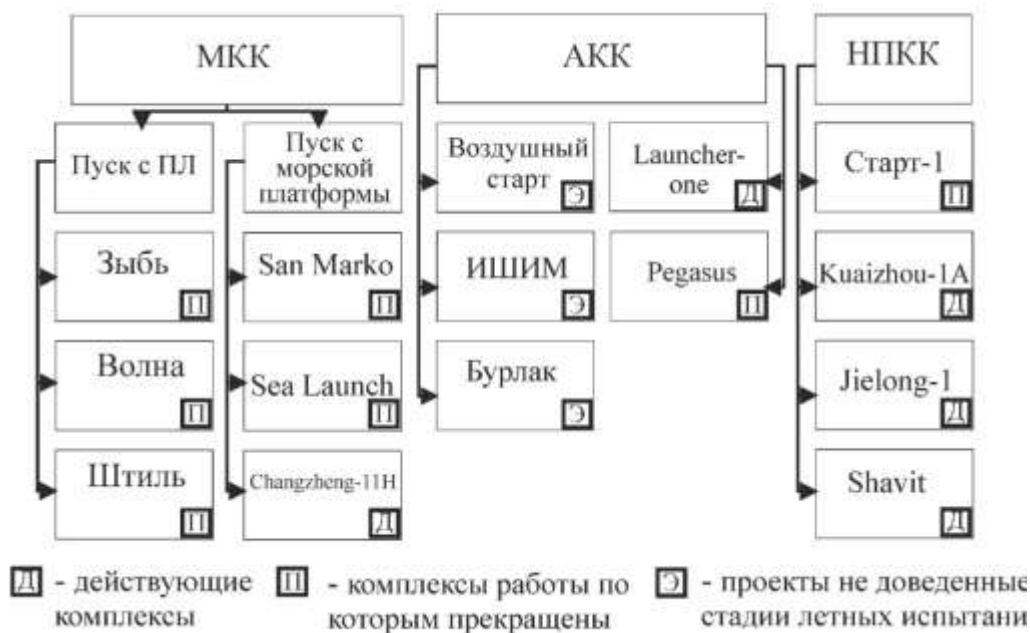


Рис. 2. Космические комплексы, включающие в свой состав подвижные элементы

Наиболее успешными являлись МКК, известные как проекты *San-Marco* (Сан-Марко) и *Sea Launch* (Морской старт) [7]. Хотя можно заметить, что платформа Сан-Марко, на которой размещались стартовое оборудование и монтажно-испытательный ангар для сборки РКН, фактически неподвижно закреплена на морском дне с помощью выдвигаемых опор. Действительно уникальным морским подвижным КК являлся Морской старт, включающий плавучую стартовую платформу, сборочно-командное судно и плавучий измерительный комплекс. Немаловажное значение при этом имело то, что специально созданный под данный проект технический комплекс, расположенный на сборочно-командном судне, позволял принимать ступени ракеты-носителя, разгонные блоки и КА, проводить их испытания и сборку РКН в целом, а также обеспечивать перегрузку ракеты в ангар стартовой платформы [8].

Одним из вариантов МКК является размещение ППУ на подводной лодке (ПЛ). Важной особенностью ПЛ является значительная дальность хода, а значит, пуск РКН может быть осуществлен практически из любой точки океана. В частности, приближение точки старта к линии экватора позволяет увеличить массу выводимой полезной нагрузки (ПН) за счет скорости вращения Земли, а возможность пуска в необитаемых районах мирового океана дает неоспоримое преимущество по выбору районов падения отделяющихся частей РН. Кроме мобильности и выбора точки старта, важнейшим достоинством указанных носителей является возможность создания РН путем доработки подлежащих списанию баллистических ракет.

Однако необходимо отметить, что при использовании ППУ на базе ПЛ хотя и существовала возможность выхода в район пуска после заблаговременной подготовки РКН на берегу, все фактически выполненные с 1991 по 2006 год пуски РКН с подводных лодок проводились в непосредственной близости от их мест постоянной дислокации. Существенным ограничивающим фактором для МКК на основе ПЛ является использование стационарных наземных технических и измерительных комплексов.

В практике отечественной космонавтики нет реализованных авиационных КК, несмотря на представляемые различными разработчиками проекты. Однако принципы, заложенные в эти проекты, направлены на решение экономической задачи обеспечения минимальной удельной стоимости выведения полезной нагрузки. Как следствие, предлагаемая для применения наземная космическая инфраструктура обеспечивает решение данной задачи.

Направление наземных подвижных КК представлено отечественными комплексами на основе твердотопливных РН «Старт» и «Старт-1» [7], запуск которых осуществлялся с 1993 по 2006 год, действующими китайскими комплексами с РН *Jielong-1* и *Kuaizhou-1A*, а также действующим израильским комплексом с РН *Shavit*.

Пуски РКН отечественными НПМК проводились в непосредственной близости от существующих космодромов. Опытно-экспериментальный характер эксплуатации таких РКК предполагал максимальное использование уже существующих позиционных районов космодромов для обеспечения подготовки РН и КА на технических комплексах космодрома, отслеживания пуска РКН стационарными измерительными средствами.

Таким образом, известные подвижные космические комплексы, в большинстве своем, обеспечивают подвижность только пусковой установки. По мнению авторов, понятие подвижного космического комплекса должно означать наличие данного свойства у других элементов, входящих в состав НПМК, и, в частности, у технического комплекса. Однако требует уточнения степень подвижности технического комплекса, так как технологическое оборудование ТК, как правило, размещается в сооружениях, а работы по подготовке КА и сборке РКН должны проводиться при заданных требованиях по температурно-влажностному режиму и чистоте окружающей среды.

Из опыта создания технических средств таможенного контроля [9] известно, что инспекционно-досмотровые комплексы делят на стационарные, мобильные (размещаемые на транспортных средствах) и перебазированные (собираемые в стационарных или быстровозводимых сооружениях из подвижных модулей). Заметим, что в соответствии со словарем военных терминов «перебазирование – изменение мест базирования авиации (базирования сил

флота) в целях создания новой, усиления имеющейся группировки или приближения частей и соединений к району (зоне) боевых действий» [10].

В рамках статьи будем понимать подвижность, как способность комплекса (техники) к перемещению (перебазированию) на транспортных средствах или своим ходом с сохранением своих показателей качества.

Приближение технического комплекса НПКК к месту пуска РКН позволяет существенно расширить диапазон возможностей, ограничиваемых географическим расположением позиционного района космодрома. Преодоление таких ограничений за счет энергетических возможностей средств выведения нереализуемо при оперативном развертывании многоспутниковой ОГ СМ КА.

Следовательно, в рамках наземного подвижного космического комплекса необходимо рассмотреть возможность и целесообразность применения перебазированного технического комплекса (ПБТК).

БАЗОВЫЕ ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ ПЕРЕБАЗИРУЕМЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

В рамках данной статьи предлагается обеспечивать подвижность космического комплекса не только через его мобильность посредством перемещения на каком-либо транспорте, но и через его способность к перебазированию элементов космического комплекса посредством перемещения (целиком или по частям, в кузовах-фургонах или контейнерах) с возможностью его развертывания (сборки) в месте непосредственного применения по назначению. При этом для размещения оборудования допускается применение сооружений из быстровозводимых конструкций или применение уже имеющихся на месте эксплуатации сооружений (зданий), удовлетворяющих заданным требованиям.

Рассмотрим базовые принципы создания для подготовки к запуску СМ КА перебазированного технического комплекса (ПБТК), входящего в состав подвижного ракетно-космического комплекса.

В настоящее время созданы все предпосылки для создания ПБТК.

Снижение массогабаритных характеристик космических аппаратов, появление класса СМ КА, имеющих прикладное значение, позволяет:

- использовать для запуска КА ракеты-носители сверхлегкого класса;
- поставлять на технический комплекс КА в состоянии высокой заводской готовности и, соответственно, минимизировать количество операций по подготовке КА на ТК и номенклатуру требуемого технологического оборудования;
- проводить работу на ТК без крупногабаритного механотехнологического оборудования.

Снижение массогабаритных характеристик РН, требуемой для запуска СМ КА, позволяет:

- применять мобильные пусковые установки с обеспечением пуска РКН из транспортно-пускового контейнера;
- применять РН с транспортно-пусковыми контейнерами, обеспечивающими высокую заводскую готовность ракеты;
- использовать транспортно-пусковой контейнер как оборудование для размещения ракеты-носителя на ТК при выполнении монтажно-стыковочных операций по сборке РКН.

Существующий уровень развития техники позволяет обеспечить мобильность комплектов контрольно-проверочной аппаратуры (КПА), что подтверждается опытом эксплуатации аппаратуры на существующих стационарных технических комплексах.

Анализ опыта эксплуатации ракетных и ракетно-космических комплексов позволяет говорить о реализуемости отечественных проектов по созданию ПБТК. В настоящее время одним из важнейших факторов создания любого РКК являются его стоимостные характеристики,

как с точки зрения стоимости космических средств, так и с точки зрения эксплуатации разрабатываемого РКК. В этом вопросе целесообразным выглядит вариант РКК с РКН, разработанной на базе межконтинентальных баллистических ракет (МБР). Снимаемые с дежурства МБР подлежат утилизации, на которую необходимо затратить значительные финансовые ресурсы. В то же время пуск РН, изготовленной путем доработки МБР с целью запуска КА, приносит ощутимый финансовый эффект. Следуя этой логике, были разработаны подвижные и стационарные наземные РКК («Старт», «Старт-1», «Рокот», «Днепр») и МКК («Зыбь», «Волна», «Штиль»).

Важно понимать, какие дополнительные возможности дает решение о разработке НПКК на базе подвижного грунтового ракетного комплекса. Кроме минимальной стоимости РН (как доработанной МБР), появляется возможность минимизировать круг задач для вновь разрабатываемого ПБТК.

При создании подвижного КК, как на основе конверсии ракетного комплекса с МБР, так и с вновь разрабатываемой РН СЛК, с учетом обеспечения высокой заводской готовности ракеты-носителя и СМ КА в условиях перебазируемого ТК остается решить три группы задач:

- сборку космической головной части;
- сборку РКН;
- проверку вновь образованных связей на РКН.

При сборке космической головной части применение пусковых контейнеров для СМ КА позволяет упростить задачу сборки (что подтверждается опытом эксплуатации, рис. 3) и снизить требования к помещению, в котором выполняются сборочные операции.

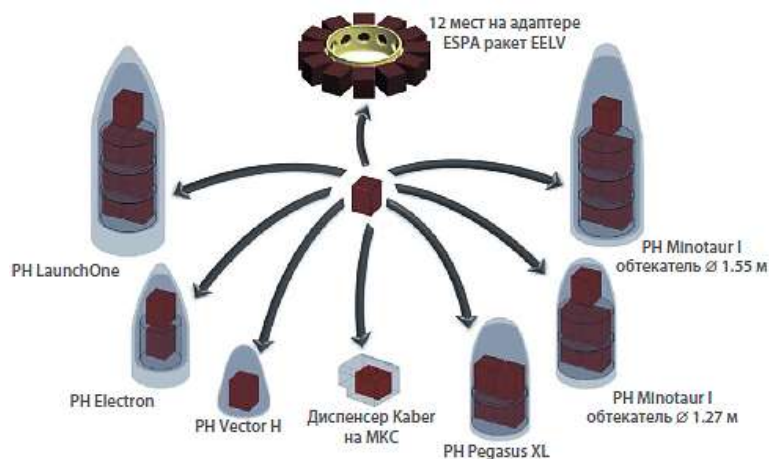


Рис. 3. Варианты размещения пусковых контейнеров в космической головной части

Уменьшение объема задач для ПБТК существенно сокращает номенклатуру КПА и комплектов механотехнологического оборудования (КМТО), задействованного при проведении работ по подготовке к пуску РКН. Кроме того, использование РН с твердотопливными ракетными двигателями позволяет исключить из технологического графика работ на ТК целый блок заправочных и связанных с заправкой операций.

При этом проведение трех упомянутых групп задач можно осуществлять как в специально возводимых сооружениях, так и в стационарных объектах, пусть и непредназначенных изначально для подготовки космических средств, но удовлетворяющих требованиям для развертывания ПБТК по ряду характеристик N :

$$N_{(4)}^{ПТК} = \langle \Gamma, Z, T, I \rangle, \quad (1)$$

где Γ – габаритные размеры сооружений (общая площадь свободного от перегородок основного помещения, наличие подходящих по высоте ворот, высота потолков);

- Z – параметры размещения необходимого КПА и КМТО;
 T – параметры требуемого температурно-влажностного режима;
 I – параметры сооружения, влияющие на организацию безопасного режима подготовки космических средств на объекте.

Структура перебазируемого технического комплекса представлена на рис. 4. В состав ПбТК входят технологическое оборудование и технические системы в мобильном исполнении, а также сооружения приведенных выше типов. При условии высокой заводской готовности РН и КА к числу обязательных элементов технологического оборудования следует отнести КМТО, КПА и систему наземного электроснабжения специальными токами (СНЭСТ). При необходимости на ПбТК должно предусматриваться размещение системы термостатирования (СТС), пневмовакуумного (ПВО), заправочно-нейтрализационного (ЗНО) и другого технологического оборудования.

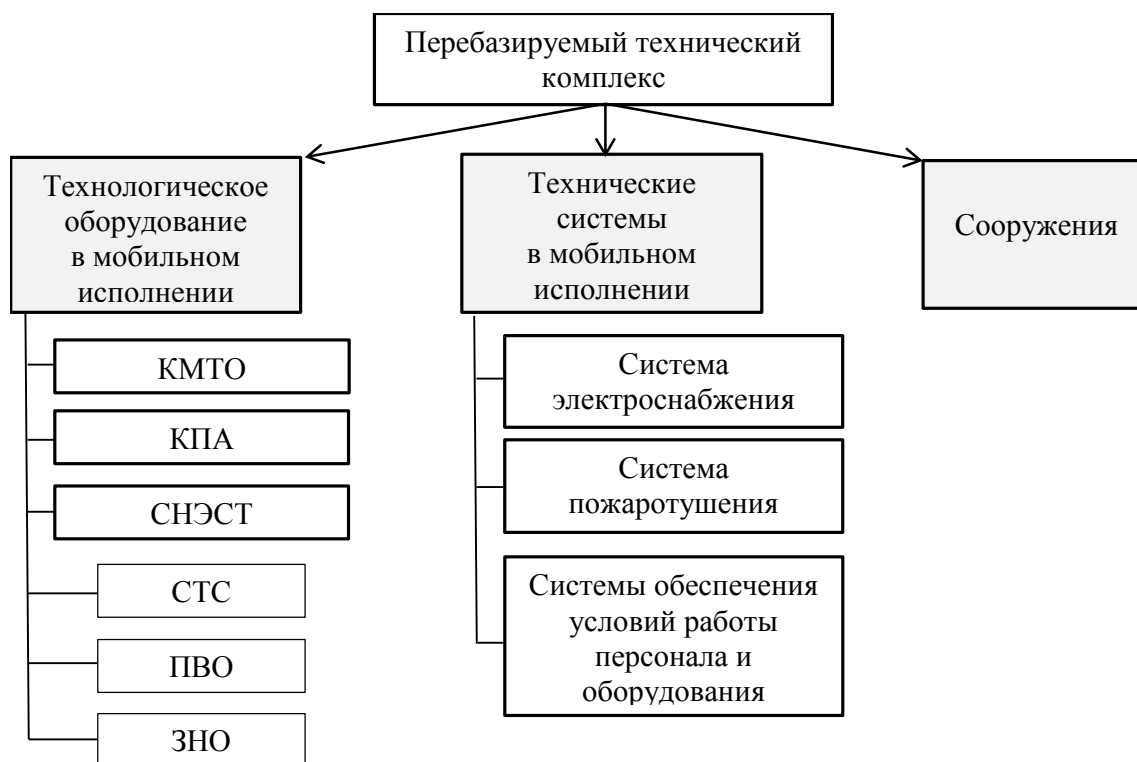


Рис. 4. Структура перебазируемого технического комплекса

В дополнение к известным принципам проектирования РКК [11] можно кратко сформулировать следующие базовые принципы создания ПбТК:

- подвижности (перебазируемости);
- минимизации количества технологических операций с РН и КА на ТК;
- мобильности технологического оборудования;
- мобильности технических систем;
- сопрягаемости технологического оборудования;
- минимизации работ по подготовке сооружений.

Соблюдение принципа подвижности ПбТК требует удовлетворения требований:

- к расстоянию перебазирования не менее требуемого $R \geq R_n^T$;
- ко времени перебазирования не более требуемого $\tau \leq \tau_n^T$.

Таким образом, интегральное качество ПбТК может быть представлено многомерным вектором $X_{(n)} = \langle x_1, \dots, x_i, \dots, x_n \rangle$, реализующим указанные принципы и оцениваемым следующим критерием оптимальности [11]:

$$O : (x_1 = x_1^{opt} | x_i \in \{x_i^d\}) \cong U$$

- где U – символ достоверного события;
 x_1, x_1^{opt} – показатель целевой эффективности и его оптимальное значение;
 x_2 – показатель совершенства структурно-топологических свойств;
 x_3, x_4 – показатели функциональных свойств (управляемости и самоорганизованности);
 x_5 – показатель устойчивости;
 x_6 – показатель подвижности.

Наличие подвижности у элементов НПКК влияет на выбор частных показателей, характеризующих их качество и эффективность применения. В частности, перебазирование в удаленные регионы, например, в приэкваториальные участки Земли, позволяет РКН выводить ПН на другие типы орбит, что не только количественно, но качественно изменит достигаемый целевой результат. А возможность перебазирования в любой из нескольких заранее подготовленных позиционных районов, удаленных относительно космодрома, повысит его живучесть и адаптивность при решении задач развертывания или наращивания многоспутниковой ОГ МКА.

Повышение эффективности выполнения целевых задач РКК, имеющим в своем составе подвижные элементы и использующим РН СЛК, также связано непосредственно со снижением показателя затрат на создание и эксплуатацию комплекса. Современные пути создания РКК предполагают капитальное строительство зданий и сооружений для размещения в них объектов НКИ. Создание указанных объектов включает: общестроительные работы, отделку внутренних помещений, монтаж и наладку спецтехнических систем, монтаж и испытания технологических систем. Указанные работы по ряду причин растягиваются на годы и требуют миллиардов рублей капиталовложений. Согласно существующей логике создания объектов НКИ, невозможно создать РКК в ограниченные сроки и с уменьшенными финансовыми затратами. Вместе с тем в настоящее время активно используются быстровозводимые щитовые конструкции, позволяющие в короткие сроки и с минимальной стоимостью создавать здания и сооружения под решение конкретных задач. Кроме того, в абсолютном большинстве населенных пунктов страны возможно найти неэксплуатируемые производственные и складские сооружения, которые будут соответствовать указанным выше требованиям.

Отдельно необходимо остановиться на вопросе использования полей падения отделяющихся частей (ОЧ) РН. В настоящее время пуск РКН с испытательного космодрома осуществляется по заранее рассчитанным трассам полета, включающим в свой состав поля падения ОЧ РН. Однако, учитывая необходимость выбора точек старта, появляется возможность в более короткие сроки определять и согласовывать новые трассы полета РКН и новые поля падения ОЧ РН, как в малонаселенных районах страны, так и акваториях, прилегающих к выгодным для пуска РКН участкам суши.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развивающееся в настоящее время актуальное направление использования СМ КА для решения задач оперативного расширения возможностей действующих орбитальных группировок при возникновении чрезвычайных ситуаций приводит к развитию требований к средствам выведения и объектам наземной космической инфраструктуры. При этом все составляющие РКК должны, во-первых, соответствовать предъявляемым требованиям по оперативности развертывания (восполнения) ОГ СМ КА, а во-вторых, обеспечивать широкий

диапазон возможностей в виду непредсказуемого характера возникающих чрезвычайных ситуаций.

Выполнение первой группы требований обеспечивается применением элементов РКК с высокой оперативностью перевода в высшие степени технической готовности. Такому требованию, в частности, удовлетворяют твердотопливные РН СЛК, транспортируемые к месту запуска СМ КА в необходимом количестве. Вторая группа требований выполняется применением перебазируемых элементов, в частности ПБТК. Причем степень полноты удовлетворения данных требований пропорциональна удаленности места непосредственного запуска КА от места постоянной дислокации. В данном ключе практически целесообразно обеспечивать возможность существенного изменения широты точки старта (как в экваториальном, так и в полярном направлениях), а также использование точек старта с районами падения ОЧ РН, недоступными для стационарных объектов НКИ космодрома.

Список используемых источников

1. *Полуян М. М., Наумочкин Д. В., Петухов И. А.* Анализ тенденций развития сверхмалых космических аппаратов // *Вооружение и экономика*. – 2019. – № 4, вып. 50. – С. 37–43.
2. Спецификация CubeSat. – URL: http://www.cubesat.org/images/developers/ /cfs_rev13_final2.pdf (дата обращения: 12.05.2023).
3. Адаптация и отделение КА. – URL: www.aerospacecapital.ru/separation-systems/ (дата обращения: 12.05.2023).
4. Требования к облику и основным проектным параметрам микроракетного комплекса, предназначенного для запуска малых летательных аппаратов размерностей «нано», «пико» и «фемто» / А. Ю. Данилюк [и др.] // *Вестник НПО имени С. А. Лавочкина*. – 2015. – № 3. – С. 107–113.
5. *Матвеев Ю. А., Позин А. А., Шершаков В. М.* Системные вопросы создания ракетно-носителей сверхлегкого класса // *Вестник НПО имени С. А. Лавочкина*. – 2019. – № 2. – С. 37–43.
6. ГОСТ Р 53802-2010. Системы и комплексы космические. Термины и определения. – М. : Стандартинформ, 2011. – 64 с.
7. *Космодромы мира: история, состояние, перспективы* / И. Ф. Левченко [и др.]. – М. : Рестарт, 2012. – 312 с.
8. *Алиев В. Г., Легостаев В. П., Лопота В. А.* Создание и пятнадцатилетний опыт эксплуатации ракетно-космической системы «Морской старт» // *Космическая техника и технология*. – 2014. – № 2(5). – С. 3–13.
9. Теория и практика применения технических средств таможенного контроля : учебник / под общ. ред. Ю. В. Малышенко. – М., 2006. – 524 с.
10. *Словарь военных терминов* / сост.: А. М. Плехов, С. Г. Шапкин. – М. : Воениздат, 1988. – 335 с.
11. *Основы проектирования ракетно-космических комплексов. Методология обоснования облика* / Г. П. Бирюков [и др.]. – СПб. : Алфавит, 2002. – 395 с.

В. Н. Арсеньев,
доктор технических наук, профессор;
А. К. Ключкин

ФОРМИРОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ТОЧНОСТНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ СИСТЕМЫ СЕЛЕКЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ МОНИТОРИНГА КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА

Рассматривается задача определения требований к характеристикам точности измерительных средств, используемых на борту космического аппарата, предназначенного для мониторинга космического мусора с целью решения задачи выбора наиболее опасного техногенного объекта из множества наблюдаемых. Задача решается на основе использования введенного ранее комбинированного признака, представляющего линейную свертку частных признаков, характеризующих наблюдаемые космические объекты.

Предложенный подход позволяет получить решение задачи выбора наиболее опасного техногенного объекта с требуемой вероятностью, а также перераспределять требования к погрешностям измерительных средств с учетом возможности их технической реализации. Приведен иллюстративный пример.

Ключевые слова: околоземное космическое пространство, техногенные объекты, частные и комбинированный показатели, измерительные средства, точностные характеристики, формирование требований.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время достаточно остро стоит проблема борьбы с космическим мусором, который представляет угрозу функционирующим космическим аппаратам (КА) [1–3]. В основной своей массе он состоит из отработавших КА, разгонных блоков, последних ступеней ракет-носителей, а также их частей, образовавшихся в результате столкновений.

Для предотвращения аварийных ситуаций проводится мониторинг околоземного космического пространства с помощью Автоматизированной системы предупреждения об опасных ситуациях (АСПОС) [4], а также объединенной системы аэрокосмической обороны США и Канады NORAD [5]. Разрабатывается перспективная Международная аэрокосмическая система глобального мониторинга (МАКСМ/IGMASS) [6], в составе которой планируется использовать специализированные космические аппараты (СКА), оснащенные оптико-электронными, радиолокационными и другими средствами наблюдения [7]. В процессе наблюдения за космическими объектами (КО) эти средства измеряют значения некоторых частных признаков (частотных и энергетических характеристик собственного или отраженного излучения, параметров движения, геометрической формы и т.д.), характеризующих наблюдаемые объекты. На основе результатов измерений и имеющейся информации о признаках космического объекта, представляющего наибольшую угрозу для функционирующих в его окрестности КА, принимается решение о наиболее опасном космическом объекте (НОКО). При этом используются различные методы [8–11]. Вероятность принятия правильного решения существенно зависит от способа обработки неоднородной измерительной информации, метрики, используемой для определения расстояния между измеренными значениями частных признаков наблюдаемых объектов и признаками НОКО, а также от точностных характеристик измерительных средств. В работе [12] предлагается использовать комбинированный безразмерный признак, представляющий собой линейную свертку измеренных значений частных признаков и позволяющий решить задачу с заданной вероятностью.

Требования к вероятности принятия правильного решения о НОКО постоянно возрастают. Для их удовлетворения существуют различные способы. Основными из них, на наш взгляд, являются:

- 1) использование дополнительных частных признаков, характеризующих наблюдаемые объекты;
- 2) увеличение числа измерений уже используемых признаков;
- 3) улучшение точностных характеристик (уменьшение погрешностей) измерительных средств.

Первый способ требует проведения трудоемких исследований отличительных особенностей наблюдаемых объектов. Второй способ часто становится трудно реализуемым вследствие ограниченного времени, отводимого на принятие решения. Для реализации третьего способа необходимо решить задачу обоснования требований к точностным характеристикам измерительных средств, при которых будет обеспечена требуемая вероятность принятия правильного решения. Рассмотрим, как можно сформулировать эту задачу математически.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Полагается, что частные признаки $X_i, i = \overline{1, n}$ (n – число признаков), характеризующие наблюдаемый объект, являются независимыми случайными величинами, распределенными по нормальному закону. Их математические ожидания равны значениям признаков $x_{\text{НОКО}i}, i = \overline{1, n}$, характеризующих наиболее опасный КО, а дисперсии совпадают с дисперсиями $D_{X_{0i}}, i = \overline{1, n}$, погрешностей измерительных средств, которые в настоящее время используются для измерения значений соответствующих частных признаков.

В дальнейшем будем обозначать случайные величины прописными буквами, а их реализации – соответствующими строчными буквами.

В качестве безразмерного комбинированного признака w , характеризующего наблюдаемый объект, используется линейная свертка измеренных значений частных признаков [12]:

$$w = \frac{1}{\sum_{i=1}^n N_i c_i^2 / D_{X_{0i}}} \sum_{i=1}^n \frac{c_i}{D_{X_{0i}}} \sum_{j=1}^{N_i} x_{ij}, \quad (1)$$

где x_{ij} – значение i -го частного признака X_i , полученное при его j -м измерении;

$N_i \geq 1$ – число измерений i -го признака;

c_i – единичные коэффициенты, размерности которых совпадают с размерностями соответствующих признаков, т. е. $[c_i] = [X_i], i = \overline{1, n}$.

Из формулы (1) получаются значение комбинированного признака наиболее опасного космического объекта

$$w_{\text{НОКО}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n N_i c_i^2 / D_{X_{0i}}} \sum_{i=1}^n \frac{N_i c_i x_{\text{НОКО}i}}{D_{X_{0i}}} \quad (2)$$

и оценка дисперсии комбинированного признака наблюдаемого объекта

$$D_w = \frac{1}{\sum_{i=1}^n N_i c_i^2 / D_{X_{0i}}}. \quad (3)$$

Из анализа последней формулы понятно, что оценка дисперсии комбинированного признака тем меньше, чем меньше дисперсии погрешностей измерительных средств и чем больше количества измерений частных признаков.

В качестве меры, характеризующей отличие наблюдаемого объекта от наиболее опасного, используется величина [12]

$$Z = \frac{(W - w_{\text{НОКО}})^2}{D_W}, \quad (4)$$

где согласно формуле (1)

$$W = \frac{1}{\sum_{i=1}^n N_i c_i^2 / D_{X_{0i}}} \sum_{i=1}^n N_i c_i X_i. \quad (5)$$

Вероятность правильной селекции космического объекта, представляющего наибольшую угрозу функционирующим КА, зависит от величины дисперсии D_W комбинированного признака и согласно формуле (3) – от величин $D_{X_{0i}}$, $i = \overline{1, n}$, характеризующих точность измерительных средств.

Пусть задано требуемое значение $P_{\text{тр}}$ вероятности правильной селекции. Тогда задача формирования требований к точностным характеристикам измерительных средств системы селекции сводится к определению таких значений дисперсий измерений частных признаков, при которых вероятность равна $P_{\text{тр}}$.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ТОЧНОСТНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ

Поскольку частные признаки X_i , $i = \overline{1, n}$, характеризующие наблюдаемый объект, распределены по нормальному закону, то и комбинированный признак W согласно формуле (5) также будет распределен нормально. Тогда при условии справедливости гипотезы о том, что математическое ожидание комбинированного признака наблюдаемого объекта равно комбинированному признаку наиболее опасного КО, величина Z будет иметь χ^2 – распределение с одной степенью свободы. Функция плотности распределения Z

$$\varphi_Z(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} z^{-1/2} e^{-z/2}.$$

Задавшись некоторой малой вероятностью γ , из уравнения

$$P(Z \geq z_\gamma) = \int_{z_\gamma}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} z^{-1/2} e^{-z/2} dz = \gamma$$

можно найти граничное значение z_γ для принятия решения о НОКО. Критическая область будет находиться правее z_γ , а вероятность отклонить наблюдаемый космический объект, когда он на самом деле является наиболее опасным, равна γ .

Событие $Z \leq z_\gamma$, когда наблюдаемый объект принимается за наиболее опасный, эквивалентно событию

$$\frac{(W - w_{\text{НОКО}})^2}{D_W} \leq z_\gamma,$$

которое можно представить следующим образом:

$$w_{\text{НОКО}} - \sqrt{z_\gamma D_W} \leq W \leq w_{\text{НОКО}} + \sqrt{z_\gamma D_W}. \quad (6)$$

Очевидно, что вероятность такого события составит $P_\gamma = 1 - \gamma$.

Если заданное значение вероятности $P_{\text{тр}}$ больше вероятности P_γ попадания случайной величины W в интервал (6), то можно найти значение $D_{W_{\text{тр}}}$ дисперсии комбинированного признака, обеспечивающее требуемую вероятность $P_{\text{тр}}$.

Поскольку функцию плотности распределения комбинированного признака можно представить в виде

$$\varphi_W(w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_{W_{\text{тр}}}}} e^{-\frac{(w-w_{\text{НОКО}})^2}{2D_{W_{\text{тр}}}}},$$

то вероятность

$$P_{\text{тр}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_{W_{\text{тр}}}}} \int_{w_{\text{НОКО}} - \sqrt{z_\gamma D_W}}^{w_{\text{НОКО}} + \sqrt{z_\gamma D_W}} e^{-\frac{(w-w_{\text{НОКО}})^2}{2D_{W_{\text{тр}}}}} dw. \quad (7)$$

Из уравнения (7) определяется требуемое значение $D_{W_{\text{тр}}}$ дисперсии комбинированного признака.

После подстановки величины $D_{W_{\text{тр}}}$ в левую часть формулы (3) вместо D_W можно найти дисперсии D_{X_i} ошибок измерений частных признаков и количества их измерений $N_i, i = \overline{1, n}$, при которых обеспечивается требуемая вероятность. Очевидно, что такая задача будет иметь множество решений. Для устранения этой неопределенности рассматриваются наиболее вероятные условия наблюдения, которые могут отличаться составом частных признаков наблюдаемого объекта. При этом полагается, что частные признаки, учитываемые при принятии решения, измеряются один раз.

Тогда дисперсии D_{X_i} ошибок измерений частных признаков, при которых удовлетворяется уравнение

$$D_{W_{\text{тр}}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n N_i c_i^2 / D_{X_i}}, \quad (8)$$

где

$$N_i = \begin{cases} 1, & \text{если признак измерен;} \\ 0, & \text{если признак не измерен,} \end{cases}$$

будем искать из условия минимума взвешенной суммы квадратов отклонений требуемых значений дисперсий ошибок измерений от дисперсий погрешностей существующих (используемых) измерительных средств, т. е. функции

$$J = \sum_{i=1}^n v_i (D_{X_i} - D_{X_{0i}})^2, \quad (9)$$

где $v_i, i = \overline{1, n}$, – весовые коэффициенты.

Важно отметить следующее. Если известно, что точностные характеристики каких-то из используемых для решения задачи селекции измерительных средств не представляется возможным улучшить в ближайший период времени, то соответствующие им слагаемые в функции (9) будут отсутствовать и общее число слагаемых будет меньше n . При этом правая часть выражения (8) остается практически без изменений, за исключением того, что дисперсии ошибок измерений таких измерительных средств являются постоянными величинами и не рассматриваются как варьируемые параметры.

Решение сформулированной выше задачи может быть получено методом неопределенных множителей Лагранжа.

Представим уравнение (8) в виде

$$\sum_{i=1}^n \frac{N_i c_i^2}{D_{X_i}} = \frac{1}{D_{W_{TP}}} \quad (10)$$

и рассмотрим функцию

$$L = \sum_{i=1}^n v_i (D_{X_i} - D_{X_{0i}})^2 + 2\lambda \left(\sum_{i=1}^n \frac{N_i c_i^2}{D_{X_i}} - \frac{1}{D_{W_{TP}}} \right),$$

где λ – неопределенный множитель.

Необходимые условия минимума L имеют вид:

$$\left. \frac{\partial L}{\partial D_{X_i}} \right|_{D_{X_i} = D_{X_{iTP}}} = 2v_i (D_{X_{iTP}} - D_{X_{0i}}) - 2\lambda \frac{N_i c_i^2}{D_{X_{iTP}}^2} = 0, \quad i = \overline{1, n};$$

$$\left. \frac{\partial L}{\partial \lambda} \right|_{D_{X_i} = D_{X_{iTP}}} = 2 \left(\sum_{i=1}^n \frac{N_i c_i^2}{D_{X_{iTP}}} - \frac{1}{D_{W_{TP}}} \right) = 0.$$

Полученная из этих условий система уравнений

$$v_i (D_{X_{iTP}} - D_{X_{0i}}) - \lambda \frac{N_i c_i^2}{D_{X_{iTP}}^2} = 0, \quad i = \overline{1, n};$$

$$\sum_{i=1}^n \frac{N_i c_i^2}{D_{X_{iTP}}} - \frac{1}{D_{W_{TP}}} = 0$$

решается методом Ньютона.

Вводятся следующие обозначения:

$$\mathbf{D}_{X_{TP}} = [D_{X_{1TP}} \quad D_{X_{2TP}} \quad \dots \quad D_{X_{nTP}}]^T; \quad \mathbf{D} = [D_{X_{1TP}} \quad D_{X_{2TP}} \quad \dots \quad D_{X_{nTP}} \quad \lambda]^T;$$

$$F_i(D_{X_{iTP}}, \lambda) = v_i (D_{X_{iTP}} - D_{X_{0i}}) - \lambda \frac{N_i c_i^2}{D_{X_{iTP}}^2}, \quad i = \overline{1, n}; \quad F_\lambda(\mathbf{D}_{X_{TP}}) = \sum_{i=1}^n \frac{N_i c_i^2}{D_{X_{iTP}}} - \frac{1}{D_{W_{TP}}};$$

$$\mathbf{F}(\mathbf{D}) = [F_1(D_{X_{1TP}}, \lambda) \quad F_2(D_{X_{2TP}}, \lambda) \quad \dots \quad F_n(D_{X_{nTP}}, \lambda) \quad F_\lambda(\mathbf{D}_{X_{TP}})]^T$$

и составляется $(n+1) \times (n+1)$ – матрица, элементами которой являются частные производные:

$$\mathbf{F}'(\mathbf{D}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1(D_{X_{1TP}}, \lambda)}{\partial D_{X_{1TP}}} & \frac{\partial F_1(D_{X_{1TP}}, \lambda)}{\partial D_{X_{2TP}}} & \dots & \frac{\partial F_1(D_{X_{1TP}}, \lambda)}{\partial D_{X_{nTP}}} & \frac{\partial F_1(D_{X_{1TP}}, \lambda)}{\partial \lambda} \\ \frac{\partial F_2(D_{X_{2TP}}, \lambda)}{\partial D_{X_{1TP}}} & \frac{\partial F_2(D_{X_{2TP}}, \lambda)}{\partial D_{X_{2TP}}} & \dots & \frac{\partial F_2(D_{X_{2TP}}, \lambda)}{\partial D_{X_{nTP}}} & \frac{\partial F_2(D_{X_{2TP}}, \lambda)}{\partial \lambda} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial F_n(D_{X_{nTP}}, \lambda)}{\partial D_{X_{1TP}}} & \frac{\partial F_n(D_{X_{nTP}}, \lambda)}{\partial D_{X_{2TP}}} & \dots & \frac{\partial F_n(D_{X_{nTP}}, \lambda)}{\partial D_{X_{nTP}}} & \frac{\partial F_n(D_{X_{nTP}}, \lambda)}{\partial \lambda} \\ \frac{\partial F_\lambda(\mathbf{D}_{X_{TP}})}{\partial D_{X_{1TP}}} & \frac{\partial F_\lambda(\mathbf{D}_{X_{TP}})}{\partial D_{X_{2TP}}} & \dots & \frac{\partial F_\lambda(\mathbf{D}_{X_{TP}})}{\partial D_{X_{nTP}}} & \frac{\partial F_\lambda(\mathbf{D}_{X_{TP}})}{\partial \lambda} \end{bmatrix},$$

Поскольку

$$\frac{\partial F_i(D_{X_{i\text{тр}}}, \lambda)}{\partial D_{X_{i\text{тр}}}} = v_i + 2\lambda \frac{N_i c_i^2}{D_{X_{i\text{тр}}}^3}; \quad \frac{\partial F_i(D_{X_{i\text{тр}}}, \lambda)}{\partial D_{X_{j\text{тр}}}} = 0; \quad \frac{\partial F_i(D_{X_{i\text{тр}}}, \lambda)}{\partial \lambda} = -\frac{N_i c_i^2}{D_{X_{i\text{тр}}}^2};$$

$$\frac{\partial F_\lambda(\mathbf{D}_{X_{\text{тр}}})}{\partial D_{X_{i\text{тр}}}} = -\frac{N_i c_i^2}{D_{X_{i\text{тр}}}^2}, \quad i, j = \overline{1, n}; \quad j \neq i; \quad \frac{\partial F_\lambda(\mathbf{D}_{X_{\text{тр}}})}{\partial \lambda} = 0,$$

то матрица частных производных принимает вид

$$\mathbf{F}'(\mathbf{D}) = \begin{bmatrix} v_1 + 2\lambda \frac{N_1 c_1^2}{D_{X_{1\text{тр}}}^3} & 0 & 0 & \dots & 0 & -\frac{N_1 c_1^2}{D_{X_{1\text{тр}}}^2} \\ 0 & v_2 + 2\lambda \frac{N_2 c_2^2}{D_{X_{2\text{тр}}}^3} & 0 & \dots & 0 & -\frac{N_2 c_2^2}{D_{X_{2\text{тр}}}^2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & v_n + 2\lambda \frac{N_n c_n^2}{D_{X_{n\text{тр}}}^3} & -\frac{N_n c_n^2}{D_{X_{n\text{тр}}}^2} \\ -\frac{N_1 c_1^2}{D_{X_{1\text{тр}}}^2} & -\frac{N_2 c_2^2}{D_{X_{2\text{тр}}}^2} & -\frac{N_3 c_3^2}{D_{X_{3\text{тр}}}^2} & \dots & -\frac{N_n c_n^2}{D_{X_{n\text{тр}}}^2} & 0 \end{bmatrix}.$$

Итерационный процесс для определения требуемых значений дисперсий ошибок измерений представляется следующим образом:

$$\mathbf{D}_k = \mathbf{D}_{k-1} - [\mathbf{F}'(\mathbf{D}_{k-1})]^{-1} \mathbf{F}(\mathbf{D}_{k-1}), \quad (11)$$

где $k=1, 2, 3, \dots$ – номер итерации.

В качестве начального приближения можно взять вектор

$$\mathbf{D}_0 = [D_{X_{01}} \quad D_{X_{02}} \quad \dots \quad D_{X_{0n}} \quad \lambda_0]^T.$$

Численные исследования итерационного процесса (11) показали его хорошую сходимость при правильном выборе значения λ_0 .

Путем изменения весовых коэффициентов $v_i, i = \overline{1, n}$, в функции (9) можно перераспределять требования к точностным характеристикам измерительных средств.

После того, как будут определены требуемые значения дисперсий погрешностей измерений частных признаков для всех наиболее вероятных условий наблюдения, из множеств этих значений выбираются минимальные для каждого признака.

Таким образом, процесс формирования требований к точностным характеристикам измерительных средств системы селекции включает следующее.

1. Определение по формуле (6) дисперсии комбинированного признака, обеспечивающей требуемую вероятность $P_{\text{тр}}$.

2. Выбор весовых коэффициентов $v_i, i = \overline{1, n}$.

3. Задание начального приближения $\mathbf{D}_0 = [D_{X_{01}} \quad D_{X_{02}} \quad \dots \quad D_{X_{0n}} \quad \lambda_0]^T$.

4. Расчет функции $\mathbf{F}(\mathbf{D})$ и матрицы частных производных $\mathbf{F}'(\mathbf{D})$ при $\mathbf{D} = \mathbf{D}_0$.

5. Определение по формуле (11) требуемых значений дисперсий ошибок измерений.

6. При необходимости выбор новых значений весовых коэффициентов, коррекция множителя λ_0 и повторение действий по пунктам 4 и 5.

ИЛЛЮСТРАТИВНЫЙ ПРИМЕР

Рассматривается один наблюдаемый КО, который характеризуется пятью безразмерными частными признаками ($n = 5$). Значение каждого признака было измерено один раз. Дисперсии погрешностей измерительных средств следующие: $D_{X_{01}} = 8$; $D_{X_{02}} = 0.55$; $D_{X_{03}} = 0.25$; $D_{X_{04}} = 0.15$; $D_{X_{05}} = 0.05$.

Известны частные признаки, характеризующие наиболее опасный КО: $x_{\text{НОКО1}} = 750$; $x_{\text{НОКО2}} = 35$; $x_{\text{НОКО3}} = 15$; $x_{\text{НОКО4}} = 5$; $x_{\text{НОКО5}} = 2$. На основе этих данных по формулам (2) и (3) получены значение $w_{\text{НОКО}} = 8.9151$ комбинированного признака наиболее опасного космического объекта и оценка $D_W = 0.0307$ дисперсии комбинированного признака наблюдаемого объекта.

Для вероятности $\gamma = 0.05$, по таблице χ^2 -распределения, определена критическая граница $z_\gamma = 3.8415$.

Если оценка комбинированного признака наблюдаемого объекта удовлетворяет условию (6), которое в данном случае эквивалентно условию

$$8.5719 \leq W \leq 9.2583, \quad (12)$$

то принимается решение о том, что наблюдаемый объект является наиболее опасным с вероятностью $P_\gamma = 0.95$.

Пусть задано требуемое значение $P_{\text{ТР}} = 0.98$ вероятности принятия правильного решения о наиболее опасном КО. Тогда из уравнения (7) находим оценку $D_{W_{\text{ТР}}} = 0.0218$ дисперсии комбинированного признака, при которой вероятность попадания комбинированного признака наблюдаемого объекта в интервал (12) равна 0.98.

Положив в выражении (9) весовые коэффициенты $v_i = 1, i = \overline{1, n}$, по формуле (11) найдем требуемые значения дисперсий погрешностей измерительных средств:

$$D_{X_{1\text{ТР}}} = 8.0000; D_{X_{2\text{ТР}}} = 0.5494; D_{X_{3\text{ТР}}} = 0.2472; D_{X_{4\text{ТР}}} = 0.1417; D_{X_{5\text{ТР}}} = 0.0304.$$

Подставив требуемые значения дисперсий в формулу (8), можно убедиться в том, что $D_{W_{\text{ТР}}} = 0.0218$.

Изменяя весовые коэффициенты $v_i, i = \overline{1, n}$ в функции (9), можно перераспределять требования к точностным характеристикам измерительных средств. Взяв, например, $v_i = 1/D_{X_{0i}}, i = \overline{1, n}$, получим:

$$D_{X_{1\text{ТР}}} = 8.0000; D_{X_{2\text{ТР}}} = 0.5439; D_{X_{3\text{ТР}}} = 0.2359; D_{X_{4\text{ТР}}} = 0.1225; D_{X_{5\text{ТР}}} = 0.0317.$$

Рассмотрим четыре варианта различных условий наблюдения, отличающихся составом частных признаков наблюдаемого объекта, которые можно измерить.

Допустим, что в 1-х условиях можно измерить по одному разу 1-й, 2-й, 3-й признаки, во 2-х условиях – 1-й, 4-й, 5-й, в 3-х условиях – 2-й, 3-й, 4-й и в 4-х условиях – 2-й, 4-й и 5-й признаки.

По приведенной выше схеме определяются:

$$\begin{aligned} & \text{– для 1-х условий наблюдения } w_{\text{НОКО}} = 36.5774, \quad D_W = 0.1683, \quad D_{W_{\text{ТР}}} = 0.1195, \\ & D_{X_{1\text{ТР}}} = 8.0000, \quad D_{X_{2\text{ТР}}} = 0.4896, \quad D_{X_{3\text{ТР}}} = 0.1612; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{– для 2-х условий наблюдения } w_{\text{НОКО}} = 6.2364, \quad D_W = 0.0373, \quad D_{W_{\text{ТР}}} = 0.0265, \\ & D_{X_{1\text{ТР}}} = 8.0000, \quad D_{X_{4\text{ТР}}} = 0.1451, \quad D_{X_{5\text{ТР}}} = 0.0326; \end{aligned}$$

– для 3-х условий наблюдения $w_{\text{НОКО}} = 12.5728$, $D_W = 0.0801$, $D_{W_{\text{ТР}}} = 0.0569$,
 $D_{X_{2\text{ТР}}} = 0.5308$, $D_{X_{3\text{ТР}}} = 0.2227$, $D_{X_{4\text{ТР}}} = 0.0892$;

– для 4-х условий наблюдения $w_{\text{НОКО}} = 4.8085$, $D_W = 0.0351$, $D_{W_{\text{ТР}}} = 0.0249$,
 $D_{X_{2\text{ТР}}} = 0.5496$, $D_{X_{4\text{ТР}}} = 0.1443$, $D_{X_{5\text{ТР}}} = 0.0319$.

На основе этих данных формируются требования к точностным характеристикам измерительных средств системы селекции с учетом условий наблюдения в виде требуемых значений дисперсий погрешностей измерений:

$$D_{X_{1\text{ТР}}} = \min\{8.0000, 8.0000\} = 8.0000; \quad D_{X_{2\text{ТР}}} = \min\{0.4896, 0.5308, 0.5496\} = 0.4896;$$

$$D_{X_{3\text{ТР}}} = \min\{0.1612, 0.2227\} = 0.1612; \quad D_{X_{4\text{ТР}}} = \min\{0.1451, 0.0892, 0.1443\} = 0.0892;$$

$$D_{X_{5\text{ТР}}} = \min\{0.0326, 0.0319\} = 0.0319.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получено одно из решений задачи определения требований к характеристикам точности измерительных средств, используемых на борту космического аппарата, предназначенного для мониторинга космического мусора с целью решения задачи селекции наиболее опасного техногенного объекта. Оно позволяет не только обеспечить требуемую вероятность селекции, но и перераспределить требования к погрешностям измерительных средств для сокращения затрат на улучшение их точностных характеристик.

Представлена зависимость дисперсии комбинированного признака от объемов измерений частных признаков, из которой видно, что чем меньше дисперсия погрешности измерения частного признака, тем сильнее влияет число измерений этого признака на вероятность правильной селекции. Наличие такой зависимости позволяет разработать практические рекомендации по составу и количеству измерительных средств системы селекции космического аппарата, предназначенного для мониторинга космического мусора.

На иллюстративном примере показана работоспособность предложенных решений.

Список используемых источников

1. Ключников В. Ю. Как очистить околоземное пространство от космического мусора? // Воздушно-космическая сфера. – 2019. – № 1(98). – С. 96–107. – DOI: 10.30981/2587-7992-2019-98-1-96-107.

2. Формирование единого классификатора опасных ситуаций в околоземном космическом пространстве / Е. А. Павлова [и др.] // Препринты ИПМ имени М. В. Келдыша. – 2020. – № 23. – С. 22. – URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2020-23>; <http://doi.org/10.20948/prepr-2020-23> (дата обращения: 26.03.2023).

3. Арсеньев В. Н., Ядренкин А. А. Выбор заданного космического объекта из множества наблюдаемых специализированным космическим аппаратом // Информационно-управляющие системы. – 2022. – № 2 (117). – С. 11–19. – DOI: 10.31799/1684-8853-2022-2-11-19 (дата обращения: 26.03.2023).

4. Шустов Б. М. О роли науки в изучении и парировании космических угроз // Вестник Российской академии наук. – 2019. – Т. 89, № 8. – С. 777–799. – URL: <http://doi.org/10.31857/S0869-5873898777-000> (дата обращения: 26.03.2023).

5. Зберя В. А. Канада и США: у истоков военно-политического сотрудничества // Россия и Америка в XXI веке. – 2020. – Вып. № 4. – С. 15. – URL: <https://rusus.jes.su/s207054760013330-0-1>. – DOI: 10.18254/S207054760013330-0 (дата обращения: 26.03.2023).

6. *Menshikov V. A., Perminov A. N., Urlichich Y. M.* The Conception of the International Global Monitoring Aerospace System (IGMASS) // *Global Aerospace Monitoring and Disaster Management*. – Springer, Vienna. – 2012. – URL: https://doi.org/10.1007/978-3-7091-0810-9_4 (дата обращения: 26.03.2023).

7. *Кириченко Д. В., Багров А. В.* Оперативное выявление космогенных угроз с помощью орбитальных средств контроля космического пространства // *Радиопромышленность*. – 2014. – № 1. – С. 174–184.

8. Прикладная статистика: классификация и снижение размерности : [справ. изд.] / С. А. Айвазян [и др.]; под ред. С. А. Айвазяна. – М. : Финансы и статистика, 1989. – 607 с.

9. *Амелькин С. А., Захаров А. В., Хачумов В. М.* Обобщенное расстояние Евклида – Махаланобиса и его свойства // *Информационные технологии и вычислительные системы*. – 2006. – № 4. – С. 40–44.

10. *Фомин Я. А.* Распознавание образов: теория и применения. – 2-е изд. – М. : ФАЗИС, 2012. – 429 с.

11. *William H. Greene.* *Econometric analysis*. – New York : Pearson Education, Inc., 2003. – 1026 p.

12. *Арсеньев В. Н., Ключкин А. К., Ядренкин А. А.* Метод выбора целевого объекта по ограниченным измерениям физически неоднородных признаков // *Известия вузов. Приборостроение*. – 2021. – Т. 64, № 10. – С. 799–805. – DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-10-799-805.

13. Оперативное выявление космогенных угроз с помощью орбитальных средств контроля космического пространства / Д. В. Кириченко [и др.] // *Радиопромышленность*. – 2014. – № 1. – С. 174–184.

М. В. Ведерников,
кандидат технических наук, старший научный сотрудник;

А. В. Ляшевский,
кандидат технических наук;

Е. А. Прокопенко,
кандидат технических наук, доцент

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНИВАНИЮ ВОЗМОЖНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТВЕРДОТОПЛИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С МЕХАНИЧЕСКИМИ ДЕФЕКТАМИ

В статье рассмотрен один из вариантов методического обеспечения для оперативного принятия обоснованного решения о возможности дальнейшего безопасного использования твердотопливных двигателей с механическими дефектами. В качестве критерия отбраковки ракетных двигателей на твердом топливе выбраны ограничения по размерам дефектов в виде трещин на корпусе и в заряде твердого топлива. В основе получения оценок состояния твердого топлива находятся расчетные соотношения для эллиптических трещин и области концентрации напряжений.

Ключевые слова: ракетный двигатель твердого топлива, заряд твердого топлива, трещина, коэффициент интенсивности напряжений.

ВВЕДЕНИЕ

Длительная эксплуатация ракетных двигателей на твердом топливе (РДТТ) показывает, что ограничения по срокам хранения и последующая безопасная эксплуатация определяются возможностью надежного использования РДТТ. Основным источником разрушения РДТТ при пуске ракеты являются дефекты в виде царапин, трещин, полостей в объеме топлива и на поверхности заряда твердого топлива (ЗТТ), которые естественным образом могут появиться при транспортировке и длительном хранении ракет [1]. В этой связи становится актуальной задача обнаружения подобных дефектов и принятия обоснованного решения о возможности применения или отбраковки ракеты.

Решение подзадачи обнаружения механических дефектов в РДТТ подробно изложено в работах [2–5].

Для оценивания возможности дальнейшей эксплуатации твердотопливной ракеты с выявленными механическими дефектами в объеме топлива и на поверхности ЗТТ необходимо применить теорию механики разрушения. В ее основе лежит выбор критерия разрушения конструкции РДТТ, для которого следует учитывать следующие факторы:

- свойства материала;
- тип нагрузки (нагрев, давление, вес, статическая или динамическая нагрузка);
- способ приложения нагрузки (однократная или последовательная, комбинированная или циклическая нагрузка);
- параметры окружающей среды (температура, влажность, срок хранения и т. д.);
- дефекты и геометрические несовершенства, связанные с изготовлением и эксплуатацией двигательной установки.

Среди перечисленных факторов особо следует выделить влияние на работоспособность РДТТ технологических и эксплуатационных дефектов в виде трещин, царапин, внутренних полостей и других видов концентраторов напряжений. При определенных условиях эти дефекты могут поставить под сомнение достоверность оценок состояния ЗТТ, получаемых с помощью традиционно используемых критериев прочности, например, таких как теория наибольших касательных напряжений или энергетический критерий Мизеса.

Для подтверждения вышесказанного на рис. 1 представлен характер изменения разрушающих напряжений (с точки зрения работоспособности РДТТ) в зависимости от половинного значения длины трещины a , имеющейся в конструкции [6, 7].

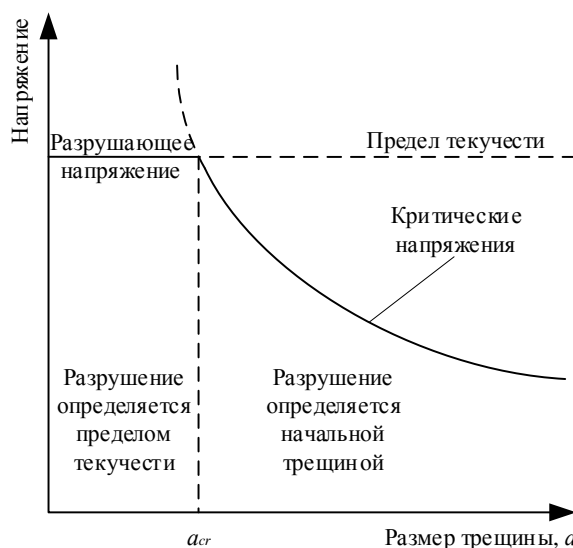


Рис. 1. Диаграмма разрушения конструкции с учетом **размера трещины**

При традиционной оценке прочности конструкции в качестве разрушающих напряжений принимается предел текучести $\sigma_{0,2}$ или предел прочности σ_b . Чаще всего это предел текучести, так как его применение позволяет более точно определить коэффициент запаса прочности. По этой причине в качестве разрушающих напряжений между нулевым значением половины длины трещины (в расчетных соотношениях применяется обычно половина длины трещины) и ее критическим значением a_{cr} принят предел текучести (рис. 1). Если значение $a > a_{cr}$, то граница начала разрушения конструкции будет определяться не пределом текучести, а переменным критическим напряжением (данный термин используется в механике разрушения и его не следует путать с критическим напряжением при потере устойчивости), которое сильно снижается при увеличении исходной длины трещины.

Оценку несущей способности конструкций с трещинами принято выполнять с помощью критерия Дж. Р. Ирвина [6, 8], в соответствии с которым эксплуатация конструкции будет безопасной (на примере отрывного смещения), если

$$K_I < \frac{K_{Ic}}{m}, \quad (1)$$

где K_I — коэффициент интенсивности напряжений;
 K_{Ic} — вязкость разрушения;
 m — коэффициент запаса прочности.

В линейной механике разрушения [6, 8] принято, что общий случай напряженного состояния в конце трещин характеризуется суперпозицией трех видов деформаций: I — отрывным смещением, когда поверхности трещины расходятся во взаимно противоположных направлениях; II — взаимно противоположным скольжением поверхностей трещины; III — скольжением поверхностей параллельно фронту трещины.

Причем вне зависимости от геометрии конструкции и характера нагрузки в окрестности трещины наблюдается одно и то же асимптотическое распределение напряжений, величина которых зависит от коэффициента интенсивности напряжений (КИН).

Наиболее универсальным методом расчета КИН является метод конечных элементов, который позволяет найти его для конструкций любой формы и при любой внешней нагрузке.

В то же время в механике разрушения получены аналитические решения для конструкций типовых геометрических форм и разнообразных нагрузок, которые с успехом могут быть использованы на стадии проектировочных расчетов и оценок работоспособности конструкции [9, 10].

Целью настоящей работы является практическое применение положений, полученных в механике разрушения, для оценивания несущей способности корпуса и ЗТТ, имеющих дефекты в виде трещины, для принятия обоснованных решений о возможности эксплуатации твердотопливных ракет с механическими дефектами.

ОЦЕНКА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КОРПУСА С ТРЕЩИНОЙ НА ЕГО ПОВЕРХНОСТИ

При работе РДТТ корпус и ЗТТ нагружены внутренним давлением p .

Цилиндрическая часть корпуса двигателя с радиусом R и толщиной стенки δ растянута в осевом (меридиональном) и тангенциальном направлениях. Если воспользоваться безмоментной теорией, меридиональные напряжения составят $\sigma_1 = pR/2\delta$, а тангенциальные – $\sigma_2 = 2\sigma_1 = pR/\delta$ и вдвое больше меридиональных. Таким образом, цилиндрическая часть корпуса разрушается вдоль осевой линии. Вследствие этого наиболее опасными с точки зрения разрушения двигателя будут поверхностные трещины, направленные вдоль оси цилиндра. Так как тангенциальные напряжения растягивающие, то поверхности трещины расходятся одна от другой, что соответствует первому виду деформации.

Воспользуемся решением, полученным для полуэллиптической поверхностной трещины в пластине конечной толщины. Если глубина трещины не превышает половины толщины пластины, то КИН имеет наибольшее значение в конце меньшей полуоси эллипса, которая направлена в глубь пластины и определяется по формуле [11]

$$K_I = 1,1\sqrt{\pi}\sigma\left(\frac{b}{Q}\right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

где σ – тангенциальное при осевой трещине и меридиональное при окружной безмоментное напряжение в цилиндре;

b – меньшая полуось эллипса, направленная внутрь стенки корпуса.

Кроме того,

$$Q = \Phi^2 - 0,212\left(\frac{\sigma}{\sigma_{0,2}}\right)^2, \quad (3)$$

где Φ – эллиптический интеграл второго рода, который определяется выражением

$$\Phi = \int \left[1 - \left(\frac{a^2 - b^2}{a^2} \right) \sin^2 \varphi \right]^{\frac{1}{2}} d\varphi.$$

Такой интеграл хорошо аппроксимируется следующим соотношением:

$$\Phi = 1 + 4,593\left(\frac{b}{2a}\right)^{1,65},$$

где a – большая полуось эллипса, равная половине длины трещины;

$\sigma_{0,2}$ – предел текучести.

Схема размещения окружной и осевой трещин на наружной поверхности цилиндрической оболочки корпуса РДТТ показана на рис. 2.

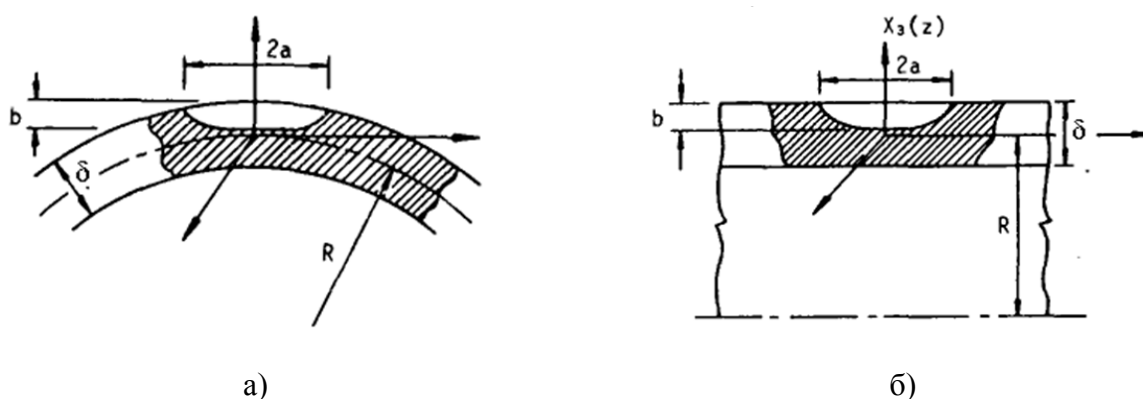


Рис. 2. Положение трещин на внешней поверхности корпуса РДТТ:
a – окружная трещина; *b* – осевая трещина

При критическом напряжении в вершине меньшей полуоси эллиптической трещины она становится неустойчивой и начинает быстро увеличиваться. Этот процесс начинается, когда КИН, определяемый по формуле (2), становится равным вязкости разрушения K_{Ic} , являющейся константой материала, определяемой экспериментально.

Критическую глубину трещины можно вычислить с помощью формулы (2), в которую следует подставить вязкость разрушения, и тогда

$$b_{cr} = \frac{Q}{1,21\pi} \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma} \right)^2, \quad (4)$$

где коэффициент Q определяется по формуле (3).

При значениях трещин $a > a_{cr}$ условие безопасной работы цилиндра определяется по критерию Дж. Р. Ирвина (1).

УСЛОВИЯ РАЗРУШЕНИЯ ЗАРЯДА ТВЕРДОГО ТОПЛИВА С ДЕФЕКТАМИ

Как и в случае корпуса двигателя, если длина трещины в топливе больше критической, то оценку несущей способности ЗТТ следует выполнять методами механики разрушения на основе критерия Дж. Р. Ирвина (1). В этом случае рост длины трещины при достижении критических напряжений сопровождается неконтролируемым увеличением ее поверхностей, а следовательно, и суммарной площади поверхности горения, что сопровождается изменением давления в камере сгорания и тяговых характеристик двигателя. Более того, корпус двигателя может быть разрушен, если давление превысит расчетные значения.

Можно выделить следующие источники возникновения трещин в ЗТТ.

1. Поверхностные трещины (рис. 3,а) [7]. Источником трещин подобного рода служат температурные напряжения при изготовлении заряда, резкий рост давления при запуске двигателя и деформации топлива при хранении в условиях колебания температур в широких пределах. При изменении температуры заряда топливо становится хрупким при низких температурах и текучим при высоких.

2. Разделение промежуточных слоев между корпусом и топливом (рис.3,б) [7]. Слои – защитно-крепящий, бронировки заряда и теплозащиты – имеют различные коэффициенты термического расширения, вследствие чего между ними возникают значительные нормальные и сдвигающие напряжения, которые их и разделяют. Разделение слоев может произойти также под действием инерционных усилий при старте и транспортировании ракет.

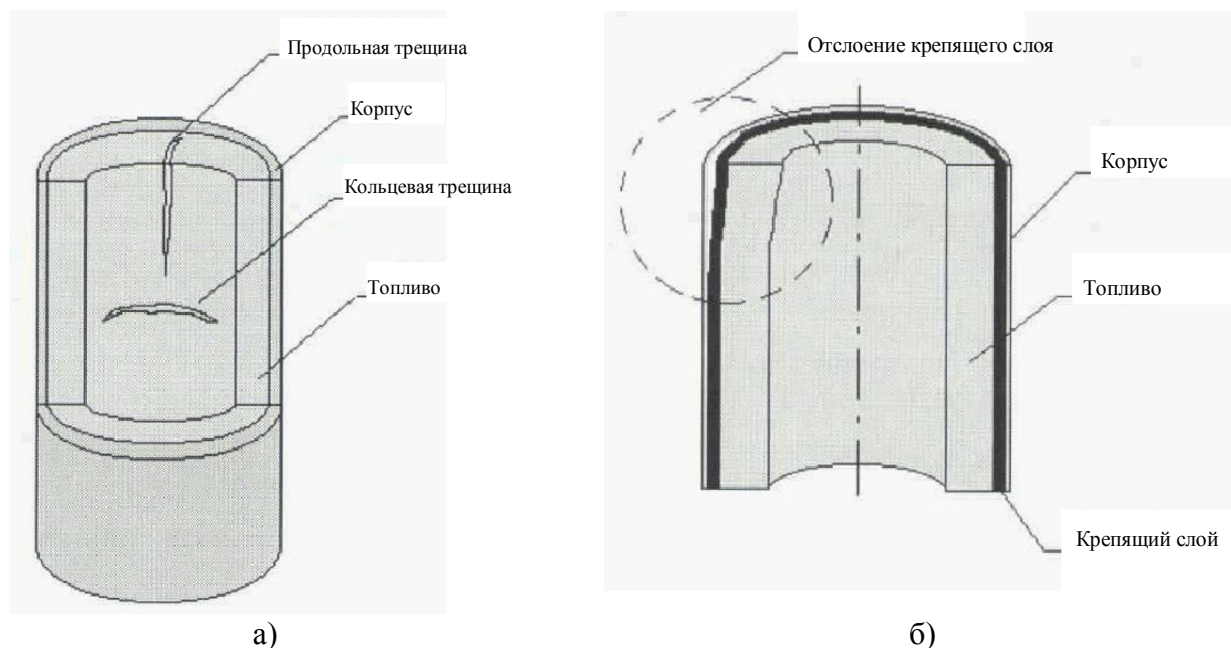


Рис. 3. Трещины:
 а – на внутренней поверхности цилиндрического ЗТТ;
 б – между корпусом двигателя и топливом

3. Нарушение адгезии в связке наполнитель – полимер и вялотекущее разложение полимерного горюче-связующего, приводящие к образованию пустот вблизи жесткого окислителя, а в результате – к увеличению микропористости топлива. Циклические термические и механические нагрузки создают сначала микротрещины между пустотами, которые затем развиваются в полноценные трещины [7].

4. Недопустимые деформации заряда, изменяющие проходные сечения внутренних каналов в топливе или разрушающие заряд на отдельные фрагменты.

Для дальнейшего анализа трещинообразования обозначим следующие условия:

– материал топлива обладает линейно-упругими свойствами с эффективным модулем упругости;

– трещина расположена на внутренней поверхности цилиндрического канала и имеет полуэллиптическую форму с большей полуосью a и меньшей b (рис. 4);

– меньшая полуось эллипса b определяет глубину трещины.

Воспользовавшись решением для КИН, полученным в механике разрушения для цилиндрической трубы с осевой внутренней полуэллиптической трещиной [9], имеем в самой глубокой точке трещину, где КИН принимает наибольшее значение:

$$K_I = \sigma_\varphi \left(\frac{\pi b}{Q} \right)^{\frac{1}{2}} F \left(\frac{b}{a}, \frac{b}{w}, \frac{r_0}{w} \right), \quad (5)$$

где r_0, r_1 – внутренний и наружный радиусы цилиндра соответственно (рис. 4);

w – толщина горящего свода, равная $r_1 - r_0$;

b, a – меньшая и большая полуоси эллиптической трещины;

σ_φ – среднее по толщине горящего свода w тангенциальное напряжение, которое можно определить по формулам Ламе [9].

При этом значения Q и F определяются следующими выражениями:

$$\begin{cases} Q = 1 + 0,464 \left(\frac{b}{a} \right)^{1,65}, \\ F = 0,97 \left[M_1 + M_2 \left(\frac{b}{w} \right)^2 + M_3 \left(\frac{b}{w} \right)^4 \right] \left(\frac{b}{a} \right)^{\frac{1}{2}} f_c, \end{cases}$$

вместе с тем

$$\begin{aligned} M_1 &= 1,13 - 0,09 \frac{b}{a}; \\ M_2 &= 0,54 + 0,89 \left(0,2 + \frac{b}{a} \right)^{-1}; \\ M_3 &= 0,5 - \left(0,65 + \frac{b}{a} \right)^{-1} + 14 \left(1 - \frac{b}{a} \right)^{24}; \\ f_c &= \left[\frac{r_1^2 + r_0^2}{r_1^2 - r_0^2} + 1 - 0,5 \left(\frac{b}{w} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \frac{w}{r_0}. \end{aligned}$$

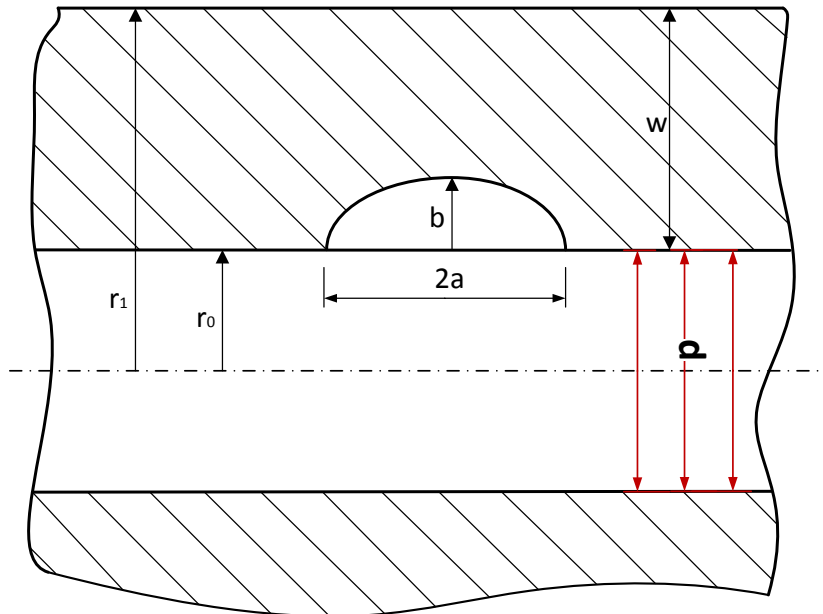


Рис. 4. Полуэллиптическая осевая трещина во внутреннем цилиндрическом канале ЗТТ

РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ ПО КОЭФФИЦИЕНТУ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ

В местах резкого изменения формы поверхности ЗТТ, таких, например, как щелевые компенсаторы или углы звездообразного сечения, возникают местные зоны с пиком напряжений, которые характеризуются коэффициентом концентрации напряжений α_σ . Его значение зависит от радиуса скругления ρ вершины концентратора и определяется как отношение наибольших местных напряжений σ_{\max} к напряжениям σ , рассчитанным без учета их концентрации, т. е. $\alpha_\sigma = \sigma_{\max} / \sigma$.

Коэффициент α_σ зависит от радиуса при вершине ρ и возрастает при его уменьшении. При стремлении $\rho \rightarrow \infty$ концентратор напряжений вырождается в локальную трещину и стремится к асимптотической величине напряжений для трещин [8].

С учетом радиуса кривизны ρ в вершине трещины асимптотическое решение для напряжений для трещин I типа (отрыв) в декартовой системе координат имеет вид [8]:

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_x \\ \sigma_y \end{array} \right\} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cdot \left[\cos \frac{\theta}{2} \left(1 \mp \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2} \right) \right] \mp \frac{\rho}{2r} \cos \frac{3\theta}{2}, \quad (6)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cdot \left(\sin \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{3\theta}{2} - \frac{\rho}{2r} \sin \frac{3\theta}{2} \right). \quad (7)$$

На рис. 5 показано положение декартовой системы координат x, y, z относительно кромки трещины с закруглением.

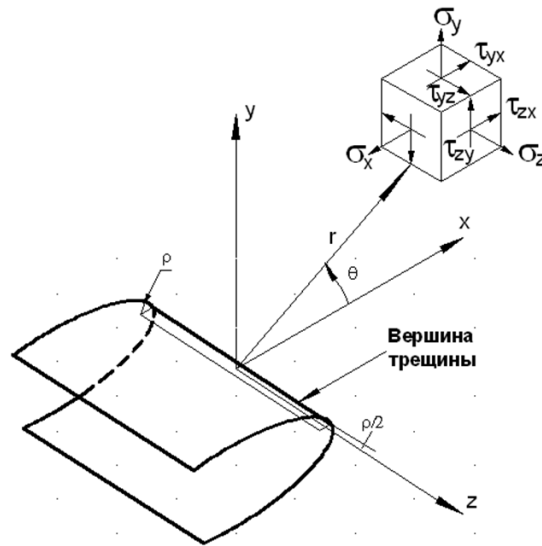


Рис. 5. Координатные оси у трещины с закруглением

В выражениях (6) и (7) нижний индекс у КИН K_I указывает на тип деформации. Начало полярной системы координат r, θ размещено на половине радиуса закругления вершины трещины, так что $r \geq \rho/2$ (рис. 5).

В случае сечения ЗТТ в виде многолучевой звезды можно предполагать, что в углах звезды возникает трещина I типа с одноосным локальным растяжением в конце разреза, и, тогда при $\theta = 0$ и $r \geq \rho/2$, получаем из (6):

$$\sigma_x = \tau_{xy} = 0, \quad \sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}}. \quad (8)$$

Из второго выражения в (8) получаем для КИН

$$K_I = \frac{1}{2} \sqrt{\pi \rho} \cdot \sigma_y. \quad (9)$$

Подставляя в выражение (9) вместо σ_y максимальные напряжения σ_{\max} , выраженные через коэффициент концентрации напряжений α_σ , и тангенциальные напряжения σ_φ в цилиндре, нагруженном внутренним давлением, и осуществляя предельный переход при $\rho \rightarrow \infty$, получаем

$$K_I = \frac{1}{2} \lim_{\rho \rightarrow 0} \sqrt{\pi \rho} \alpha_c \sigma_\varphi, \quad (10)$$

где σ_φ определяется по формулам Ламе [8].

Далее в выражение (10) необходимо подставить зависимость коэффициента концентрации напряжений α_c от радиуса кривизны ρ в вершине трещины, которая имеет обратную пропорциональность, так как с уменьшением радиуса ρ локальные напряжения в зоне их концентрации возрастают.

Обычно в справочниках по концентрации напряжений [13] значения указанного коэффициента приводятся в виде графиков. Поэтому для получения этой зависимости нужно выполнить интерполяцию выбранного графика и затем полученное выражение подставить в выражение (10) для получения КИН.

ВЯЗКОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

Наряду с механическими характеристиками, такими как предел прочности, текучести и модуль упругости, еще одной важной характеристикой материала является его вязкость разрушения K_{Ic} , которая показывает способность материала противостоять трещинообразованию (табл. 1).

Таблица 1

Вязкость разрушения типичных материалов

Материал	Модуль упругости, E [ГПа]	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$ [МПа]	Вязкость разрушения, K_{Ic} [МПа·м ^{3/2}]
Стали			
Малоуглеродистая	210	260	54
Сосуды давления	210	470	208
Высокопрочная	210	1460	98
Нержавеющая	210	1530	83
Алюминиевые сплавы			
2024 Т8	72	420	27
7075 Т6	72	540	30
7178 Т6	72	560	23
Титановые сплавы			
Ti-6Al-4V	115	1060	73
Высокопрочный	115	1100	38
Неметаллы			
Бетон	45	80	0,2–1,4
Лед	9,1	85	0,2
Эпоксид	2–3	30–60	0,5–3
Бороволокно	441	3000	-
Углеволокно	250–390	2200–2700	-
Борэпоксидная смесь	220–340	725–1730	46
Углепластик	70–200	300–1400	32–45
Стеклопластик	38	100–300	20–60

Вязкость разрушения определяется экспериментально и имеет размерность – Па·м^{3/2}. Для замыкания расчетных соотношений, описанных выше, в таблице для справки приведены значения вязкости разрушения типичных конструкционных материалов, заимствованные из работы [14].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Общая схема расчета конструкции состоит из следующей последовательности шагов.

1. Определить размеры и положение трещины в конструкции.
2. Вычислить коэффициент интенсивности напряжений для найденного в конструкции дефекта.
3. Взять из таблицы свойств материала коэффициент вязкости разрушения.

4. Воспользовавшись силовым критерием Дж. Р. Ирвина, оценить прочность конструкции.

Приведенные соотношения (1)–(10) позволяют оценить прочность корпуса и заряда РДТТ с учетом дефектов в виде трещин с известными размерами. Кроме размеров трещины должен быть известен коэффициент вязкости материала и коэффициент концентрации напряжений в зонах со скачками поверхности заряда.

Изложенную методику оценки прочности конструкции РДТТ в силу простоты расчетных соотношений, что не снижает достоверности получаемых результатов, удобно использовать на этапах эксплуатации твердотопливных ракет для оперативного принятия обоснованных решений о возможности их дальнейшего использования.

Список используемых источников

1. *Липанов А. М., Милёхин Ю. М.* Внутренняя баллистика РДТТ. – М. : Машиностроение, 2007. – 504 с.
2. *Староселец В. Г., Турковский Т. С.* Определение оптимальных сроков предупредительных мероприятий в системе технического обслуживания и ремонтов ракетно-артиллерийского вооружения по состоянию // Известия РАН. – 2017. – Вып. 98. – С. 52–57.
3. *Ляшевский А. В.* Рентгеновская вычислительная томография как метод диагностирования заряда твердого топлива в условиях эксплуатации // Сборник трудов Военно-научной конференции «Проблемные вопросы эксплуатации средств ракетно-космической обороны». – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2014. – С. 10–11.
4. *Ляшевский А. В., Ведерников М. В.* Применение рентгеновского компьютерного томографа в системе контроля заряда твердого топлива при эксплуатации объектов ракетно-космической техники // Сборник трудов V Молодежной НТК «Инновационный арсенал молодежи 2014». – СПб. : ФГУП «КБ «Арсенал» им. М. В. Фрунзе», 2014. – С. 159–162.
5. *Ляшевский А. В., Ведерников М. В.* Рентгеновская компьютерная томография как метод оценивания стабильности твердого ракетного топлива в войсках ВКО // Сборник трудов II Всероссийской НПК «Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники». – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2014. – С. 58–60.
6. *Партон В. З.* Механика разрушения: От теории к практике. – М. : Наука, 1990. – 240 с.
7. *Погорелов В. И.* Строительная механика тонкостенных конструкций. – СПб. : БХВ-Петербург, 2007. – 528 с.
8. *Пестриков В. М., Морозов Е. М.* Механика разрушения твердых тел : курс лекций. – СПб. : Профессия, 2002. – 320 с.
9. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений / под ред. Ю. Мураками. – М. : Мир, 1990. – 448 с.

10. *Саврук М. П.* Механика разрушения и прочность материалов : справочное пособие : в 4 т. – Киев : Наукова думка, 1988. – Т. 2 : Коэффициенты интенсивности напряжений в телах с трещинами. – 620 с.
11. Astronautic Structures Manual [NASA TM-73305] / Marshall Space Flight Center. – Alabama, 1975. – Vol. I [Section E: Fracture Mechanics]. – 846 p.
12. *Савин Г. Н., Тульчий В. И.* Справочник по концентрации напряжений. – Киев : издательское объединение «Вища школа», 1976. – 412 с.
13. *Wang C. H.* Introduction to Fracture Mechanics. Airframes and Engines Division. – Aeronautical and Maritime Research Laboratory, 1996. – 72 p.

А. Ю. Иваню;
Е. В. Копкин,
доктор технических наук, профессор;
В. В. Мышко,
кандидат технических наук, доцент

ОЦЕНИВАНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ПРОВЕРОК С ИНТЕРВАЛЬНОЙ ФОРМОЙ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ

Предлагается многоальтернативная процедура оценивания достоверности проверок диагностических признаков, имеющих интервальную форму представления, при условии, что число возможных исходов таких проверок может быть значительно больше двух и отсутствуют сведения о значениях вероятностей ошибок первого и второго рода. Приводится пример реализации процедуры.

Ключевые слова: техническое состояние, диагностический признак, достоверность диагностирования.

ВВЕДЕНИЕ

Возможность эффективного функционирования сложной системы во многом зависит от качества определения ее технического состояния (ТС), т. е. от диагностирования. Важнейшей составляющей качества диагностирования является его достоверность, под которой понимается степень объективного соответствия результатов диагностирования действительному техническому состоянию объекта. Достоверность диагностирования можно оценить только вероятностью правильного определения технического состояния объекта. Достоверность является важнейшим показателем результативности процесса диагностирования, так как принимаемые по его результатам решения связаны с определенными рисками, для парирования последствий которых как минимум потребуются дополнительные затраты ресурсов.

Если диагностические признаки (ДП) имеют бинарную форму представления, а также имеются исходные данные о вероятностях ошибок 1-го и 2-го рода, то можно построить оптимальную программу диагностирования объекта с заданной глубиной по критерию максимума достоверности, используя метод динамического программирования. Такая задача решена в работе [1].

Использование дискретизации для представления модельных значений ДП является определенным упрощением. Поэтому наиболее общей формой их представления, более адекватно описывающей моделируемый объект анализа, являются вещественные числа, а точнее – интервалы на вещественной числовой оси. При этом количество возможных исходов проверок (альтернатив выбора) и, соответственно, количество ошибок их определения может быть значительно больше двух, что приводит к необходимости разработки процедуры многоальтернативного определения достоверности этих исходов.

Для решения задачи определения вероятностей ошибок в описанной выше ситуации ранее использовались номограммы, разработанные для разных законов распределения [2, 3]. Эти номограммы устанавливают зависимость вероятностей ошибок от точности средств измерений. Такой подход использован в статье [4], однако процедура анализа номограмм сама по себе достаточно трудоемкая и плохо поддается автоматизации. В связи с этим возникает необходимость поиска других подходов к оцениванию достоверности проверок ДП, имеющих интервальную форму представления, а указанная задача становится актуальной и практически значимой.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для решения задачи, также как и в работе [4], будем полагать заданными:

– множество ТС объекта $\mathbf{S} = \{S_i \mid i = \overline{1, m}\}$;

– множество ДП параметров объекта $\Pi = \{\pi_j \mid j = \overline{1, n}\}$;

– множество интервалов $L = \{\ell_{ij} \mid i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}\}$, определяющее допустимые значения ДП в каждом ТС.

В процессе диагностирования выполняются проверки ДП, анализируются их исходы и принимается решение о том, в каком из заданных ТС находится объект. Указанные проверки составляют множество $\hat{\Pi} = \{\hat{\pi}_j \mid j = \overline{1, n}\}$.

В ходе выполнения проверки $\hat{\pi}_j$ признака π_j измеряется его текущее значение y_j и выявляется принадлежность этого значения интервалу $\ell_{ij} \in L$ или нескольким интервалам, если они пересекаются. Измеренные значения y_j соответствующих ДП π_j ($j = \overline{1, n}$) представляют собой произвольные вещественные числа, равномерно распределенные по заданным интервалам ℓ_{ij} .

В процессе диагностирования, как правило, возникает неопределенность в определении конкретного ТС, в котором находится объект, поскольку интервалы $\ell_{ij} \in L$, соответствующие различным ТС, $S_i \in \mathbf{S}$ для ДП $\pi_j \in \Pi$ могут пересекаться между собой. В связи с этим введем в рассмотрение понятие «информационное состояние» (ИС) процесса диагностирования, которое обозначим $R_k \subseteq \mathbf{S}$, характеризующее степень неопределенности ТС объекта.

Любое ИС – это подмножество множества \mathbf{S} , состоящее из одного или более (вплоть до m) элементов, подлежащих распознаванию ТС, а совокупность всех возможных ИС образует множество $\Omega = \{R_k \mid k = \langle \{i\}, i = \overline{1, m} \rangle\}$.

Конечные ИС – это одноэлементные множества $R_i = \{S_i\}$, $i = \overline{1, m}$, которые уже не содержат неопределенности. Промежуточные ИС ($R_k \subset \mathbf{S}$) и начальное ИС ($R_k = \mathbf{S}$) содержат в своем составе более одного элемента. Каждое ИС характеризуется соответствующей вероятностью $P(R_k)$, используемой в процессе выбора проверок, выполняемых при определении ТС.

Исходом проверки $\hat{\pi}_j$, выполняемой в ИС R_k , является событие, заключающееся в попадании измеренного значения y_j признака π_j в один из подынтервалов Δ_{kj}^v , на которых имеет место пересечение интервалов ℓ_{ij} , соответствующих техническим состояниям $S_i \in R_k$, т. е.

$$\Delta_{kj}^v = \bigcap_{\{i\}} \ell_{ij},$$

где v – порядковый номер подынтервала, $v = \overline{1, \omega_{kj}}$;

ω_{kj} – количество возможных подынтервалов, равное числу возможных исходов проверки;

$\{i\}$ – множество индексов взаимно пересекающихся интервалов.

Подынтервалы Δ_{kj}^v имеют в общем случае разную длину и отличаются друг от друга числом и составом пересекающихся на них интервалов ℓ_{ij} . Тогда событие $y_j \in \Delta_{kj}^v$ ($v = \overline{1, \omega_{kj}}$) обозначим $\hat{\pi}_j^v$, а проверку $\hat{\pi}_j$ представим в виде отображения

$$\hat{\pi}_j : R_k \rightarrow R_{kj}^v, \text{ если } y_j \in \Delta_{kj}^v \left(v = \overline{1, \omega_{kj}} \right), \quad (1)$$

где $R_{kj}^v \subset R_k$ – ИС, образуемое в соответствии с выражениями:

$$R_{kj}^v = \left\{ S_i \in R_k \mid i : \bigcap_{\{i\}} \ell_{ij} \neq \emptyset \right\}; \quad \Delta_{kj}^v = \bigcap_{\{i: S_i \in R_{kj}^v\}} \ell_{ij}; \quad \bigcup_{v=1}^{\omega_{kj}} R_{kj}^v = R_k.$$

Вероятность $P_k(\hat{\pi}_j^v)$ исхода проверки $\hat{\pi}_j$, выполненной в ИС R_k , определяется как условная вероятность $P(R_{kj}^v / R_k)$ перехода из ИС R_k в ИС R_{kj}^v согласно отображению (1) и вычисляется по формуле

$$P_k(\hat{\pi}_j^v) = P(R_{kj}^v / R_k) = \frac{P(R_{kj}^v)}{P(R_k)} = \frac{|\Delta_{kj}^v|}{|\nabla_{kj}|} = \frac{\left| \bigcap_{\{i: S_i \in R_{kj}^v\}} \ell_{ij} \right|}{\left| \bigcup_{\{f: S_f \in R_k\}} \ell_{fj} \right|}, \quad (2)$$

где $|\Delta_{kj}^v|$ и $|\nabla_{kj}|$ – длины пересечения и объединения соответствующих подынтервалов.

Введем в рассмотрение следующие обозначения:

$d_{kj}^v = P[R_{kj}^v / (y_j \in \Delta_{kj}^v)]$ – апостериорная достоверность исхода проверки;

$\gamma_{kj}^{uv} = P[R_{kj}^u / (y_j \in \Delta_{kj}^v)]$ – апостериорная вероятность ошибки, допускаемой при определении исхода проверки.

Величины $d_{kj}^v (v = \overline{1, \omega_{kj}})$ и $\gamma_{kj}^{uv} (u, v = \overline{1, \omega_{kj}}; u \neq v)$ представляют собой условные вероятности событий, заключающихся в фиксации по результатам проверки $\hat{\pi}_j$, выполняемой в ИС R_k , исходов $R_{kj}^v (v = \overline{1, \omega_{kj}})$ и $R_{kj}^u (u = \overline{1, \omega_{kj}}; u \neq v)$ соответственно. При этом действительно выполняется условие $y_j \in \Delta_{kj}^v$.

При указанных условиях требуется определить:

– апостериорные вероятности $\gamma_{kj}^{uv} (u, v = \overline{1, \omega_{kj}}; u \neq v)$ ошибок определения исходов проверки $\hat{\pi}_j$, выполняемой в произвольном ИС R_k ;

– апостериорные достоверности $d_{kj}^v (v = \overline{1, \omega_{kj}})$ исходов проверки $\hat{\pi}_j$, выполняемой в произвольном ИС R_k ;

– достоверность $d_k(\hat{\pi}_j)$ проверки $\hat{\pi}_j$, выполняемой в произвольном информационном состоянии R_k .

ПРОЦЕДУРА ОЦЕНИВАНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ ПРОВЕРОК ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ

Поскольку исходы проверки $\hat{\pi}_j$, выполняемой в произвольном информационном состоянии R_k , составляют полную группу событий, то справедливо выражение

$$d_{kj}^v + \sum_{\substack{u=1 \\ u \neq v}}^{\omega_{kj}} \gamma_{kj}^{uv} = 1 (v = \overline{1, \omega_{kj}}), \quad (3)$$

из которого следует, что

$$d_{kj}^v = 1 - \sum_{\substack{u=1 \\ u \neq v}}^{\omega_{kj}} \gamma_{kj}^{uv} \quad (v = \overline{1, \omega_{kj}}). \quad (4)$$

Введем в рассмотрение матрицу апостериорных вероятностей соответствий информационных состояний и исходов проверки

$$\mathbf{P}_{kj[\omega_{kj}]}^{\Pi} = \begin{bmatrix} d_{kj}^1 & \gamma_{kj}^{21} & \dots & \gamma_{kj}^{v1} & \dots & \gamma_{kj}^{\omega_{kj}1} \\ \gamma_{kj}^{12} & d_{kj}^2 & \dots & \gamma_{kj}^{v2} & \dots & \gamma_{kj}^{\omega_{kj}2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \gamma_{kj}^{1v} & \gamma_{kj}^{2v} & \dots & \gamma_{kj}^{uv} & \dots & \gamma_{kj}^{\omega_{kj}v} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \gamma_{kj}^{1\omega_{kj}} & \gamma_{kj}^{2\omega_{kj}} & \dots & \gamma_{kj}^{v\omega_{kj}} & \dots & d_{kj}^{\omega_{kj}} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

В этой матрице элементами главной диагонали являются апостериорные достоверности $d_{kj}^v (v = \overline{1, \omega_{kj}})$ исходов проверки $\hat{\pi}_j$, выполняемой в произвольном ИС R_k , а остальные элементы представляют собой апостериорные вероятности $\gamma_{kj}^{uv} (u, v = \overline{1, \omega_{kj}}; u \neq v)$ ошибок определения исходов проверки $\hat{\pi}_j$, выполняемой в произвольном ИС R_k . Сумма элементов каждой строки матрицы $\mathbf{P}_{kj[\omega_{kj}]}^{\Pi}$ согласно выражению (3) равна единице.

Кроме матрицы (5) введем в рассмотрение еще ряд матриц.

При известных информационных состояниях $R_{kj}^v (v = \overline{1, \omega_{kj}})$ распределение исходов проверки $\hat{\pi}_j$, выполняемой в произвольном ИС R_k , задается матрицей априорных вероятностей соответствий

$$\mathbf{P}_{kj[\omega_{kj}]}^{\Delta} = \begin{bmatrix} D_{kj}^1 & \Gamma_{kj}^{21} & \dots & \Gamma_{kj}^{v1} & \dots & \Gamma_{kj}^{\omega_{kj}1} \\ \Gamma_{kj}^{12} & D_{kj}^2 & \dots & \Gamma_{kj}^{v2} & \dots & \Gamma_{kj}^{\omega_{kj}2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Gamma_{kj}^{1v} & \Gamma_{kj}^{2v} & \dots & \Gamma_{kj}^{uv} & \dots & \Gamma_{kj}^{\omega_{kj}v} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Gamma_{kj}^{1\omega_{kj}} & \Gamma_{kj}^{2\omega_{kj}} & \dots & \Gamma_{kj}^{v\omega_{kj}} & \dots & D_{kj}^{\omega_{kj}} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Элементы $D_{kj}^v = P[(y_j \in \Delta_{kj}^v) / R_{kj}^v]$ главной диагонали матрицы (6) представляют собой априорные достоверности исходов проверки – условные вероятности того, что измеренное значение y_j , которое будет получено в результате проверки $\hat{\pi}_j$, выполняемой в ИС R_k , попадет в подынтервал Δ_{kj}^v , при условии, что будет зафиксировано ИС $R_{kj}^v (v = \overline{1, \omega_{kj}})$. Остальные элементы матрицы (6), т. е. $\Gamma_{kj}^{uv} = P[(y_j \in \Delta_{kj}^v) / R_{kj}^u]$, представляют собой априорные вероятности ошибок определения исходов проверки – условные вероятности событий, заключающихся в том, что в результате проверки $\hat{\pi}_j$, выполняемой в ИС R_k , измеренное значение y_j будет при-

надлежать подынтервалу Δ_{kj}^v , при условии фиксации исхода R_{kj}^u ($u = \overline{1, \omega_{kj}}; u \neq v$). Сумма элементов каждой строки матрицы $\mathbf{P}_{kj[\omega_{kj}]}^{\Delta}$ также равна единице.

Матрица безусловных вероятностей соответствий имеет вид

$$\mathbf{P}_{kj[\omega_{kj}]}^{\Delta} = \begin{bmatrix} P(R_{kj}^1 \cup (y_j \in \Delta_{kj}^1)) & \dots & P(R_{kj}^1 \cup (y_j \in \Delta_{kj}^{\omega_{kj}})) \\ \dots & \dots & \dots \\ P(R_{kj}^{\omega_{kj}} \cup (y_j \in \Delta_{kj}^1)) & \dots & P(R_{kj}^{\omega_{kj}} \cup (y_j \in \Delta_{kj}^{\omega_{kj}})) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Элементы матрицы (7) представляют собой вероятности совместной реализации рассматриваемых событий – возможных исходов R_{kj}^v ($v = \overline{1, \omega_{kj}}$) проверки $\hat{\pi}_j$ и принадлежности значения y_j подынтервалу Δ_{kj}^u ($u = \overline{1, \omega_{kj}}$). Сумма элементов v -й строки этой матрицы будет равна вероятности $P(R_{kj}^v)$, т. е.

$$\sum_{u=1}^{\omega_{kj}} P(R_{kj}^v \cup (y_j \in \Delta_{kj}^u)) = P(R_{kj}^v), \quad v = \overline{1, \omega_{kj}},$$

а сумма элементов u -го столбца матрицы будет равна $P(y_j \in \Delta_{kj}^u)$.

Вероятности, расположенные на главной диагонали матрицы (7), определяются из следующих равнозначных выражений:

$$P(R_{kj}^v \cup (y_j \in \Delta_{kj}^v)) = P(R_{kj}^v) d_{kj}^v, \quad v = \overline{1, \omega_{kj}};$$

$$P(R_{kj}^v \cup (y_j \in \Delta_{kj}^v)) = P(y_j \in \Delta_{kj}^v) D_{kj}^v, \quad v = \overline{1, \omega_{kj}}.$$

Из вероятностей $P(R_{kj}^v)$ и $P(y_j \in \Delta_{kj}^v)$ можно сформировать диагональные матрицы $\mathbf{R}_{kj[\omega_{kj}]}$ и $\Delta_{kj[\omega_{kj}]}$:

$$\mathbf{R}_{kj[\omega_{kj}]} = \begin{bmatrix} P(R_{kj}^1) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & P(R_{kj}^2) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & P(R_{kj}^{\omega_{kj}}) \end{bmatrix}; \quad (8)$$

$$\Delta_{kj[\omega_{kj}]} = \begin{bmatrix} P(y_j \in \Delta_{kj}^1) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & P(y_j \in \Delta_{kj}^2) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & P(y_j \in \Delta_{kj}^{\omega_{kj}}) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Вероятности $P(R_{kj}^v)$ определяются из выражения

$$P(R_{kj}^v) = P(R_k) P_k(\hat{\pi}_j^v), \quad v = \overline{1, \omega_{kj}}, \quad (10)$$

а вероятности $P(y_j \in \Delta_{kj}^v)$ – по формуле

$$P(y_j \in \Delta_{kj}^v) = \sum_{u=1}^{\omega_{kj}} P(R_{kj}^u \cup (y_j \in \Delta_{kj}^v)), \quad v = \overline{1, \omega_{kj}}. \quad (11)$$

Учитывая результаты работы [5] и введенные обозначения, запишем соотношения, связывающие матрицы (5)–(9) между собой:

$$\mathbf{P}_{kj[\omega_{kj}]}^B = \mathbf{R}_{kj[\omega_{kj}]} \cdot \mathbf{P}_{kj[\omega_{kj}]}^D; \tag{12}$$

$$\left[\mathbf{P}_{kj[\omega_{kj}]}^B \right]^T = \Delta_{kj[\omega_{kj}]} \cdot \mathbf{P}_{kj[\omega_{kj}]}^\Pi; \tag{13}$$

$$\mathbf{P}_{kj[\omega_{kj}]}^\Pi = \Delta_{kj[\omega_{kj}]}^{-1} \cdot \left[\mathbf{P}_{kj[\omega_{kj}]}^D \right]^T \cdot \mathbf{R}_{kj[\omega_{kj}]} \tag{14}$$

Таким образом, апостериорные достоверности и вероятности ошибок определения исходов проверки выводятся из априорных.

Если известна достоверность каждого из возможных исходов проверки, можно оценить среднюю достоверность проверки $\hat{\pi}_j$, выполняемой в ИС R_k , используя формулу

$$d_k(\hat{\pi}_j) = \sum_{v=1}^{\omega_{kj}} P_k(\hat{\pi}_j^v) d_{kj}^v, \quad v = \overline{1, \omega_{kj}}, \tag{15}$$

представляющую собой взвешенную вероятностями этих исходов сумму, слагаемыми которой являются значения достоверностей исходов проверки.

Рассмотрим один из возможных подходов к оцениванию вероятностей ошибок, возможных при определении исходов проверки. Предположим, что источником таких ошибок является только погрешность измерительного устройства, посредством которого осуществляется измерение значения ДП. Другие источники возможных ошибок, такие как помехи, аномальные измерения и т. п., учитывать в рамках данной работы не будем.

Обозначим через δ_j величину абсолютной погрешности устройства, измеряющего текущее значение y_j признака π_j . Для наглядности изобразим на рис. 1 возможные исходы проверки $\hat{\pi}_j$, выполняемой в произвольном информационном состоянии $R_{if} = \{S_i, S_f\}$. Техническим состояниям S_i и S_f , входящим в состав R_{if} , для ДП π_j сопоставлены модельные интервалы ℓ_{ij} и ℓ_{ff} , каждый из которых имеет левую и правую границу, т. е. $\ell_{ij} = (\ell_{ij}^n; \ell_{ij}^n)$; $\ell_{ff} = (\ell_{ff}^n; \ell_{ff}^n)$.

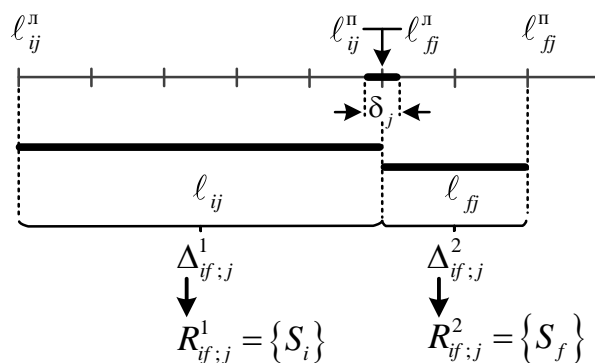


Рис. 1. Возможные исходы проверки $\hat{\pi}_j$, выполняемой в ИС $R_{if} = \{S_i, S_f\}$

В соответствии с отображением (1) проверка $\hat{\pi}_j$ будет иметь следующие исходы:

$$\hat{\pi}_j : R_{if} \rightarrow \begin{cases} R^1_{if;j} = \{S_i\}, & \text{если } y_j \in \Delta^1_{if;j} = (\ell_{ij}^n; \ell_{ij}^n); \\ R^2_{if;j} = \{S_f\}, & \text{если } y_j \in \Delta^2_{if;j} = (\ell_{ff}^n; \ell_{ff}^n). \end{cases}$$

Для рассматриваемого случая ошибка в определении действительного исхода проверки возможна в случае, когда значение y_j принадлежит отрезку $\left(\ell_{ij}^n - \frac{1}{2}\delta_j; \ell_{ff}^n + \frac{1}{2}\delta_j\right)$ длиной δ_j .

При этом априорные вероятности ошибок при определении исхода проверки могут быть вычислены по формуле, аналогичной (2), а именно:

$$\Gamma_{if;j}^{12} = P\left[(y_j \in \Delta_{if;j}^2) / R_{if;j}^1\right] = \frac{0,5\delta_j}{|\ell_{ij} \cup \ell_{ff}|};$$

$$\Gamma_{if;j}^{21} = P\left[(y_j \in \Delta_{if;j}^1) / R_{if;j}^2\right] = \frac{0,5\delta_j}{|\ell_{ij} \cup \ell_{ff}|}.$$

Причем эти вероятности являются одинаковыми.

Зная вероятности ошибок, несложно определить значения априорных достоверностей:

$$D_{if;j}^1 = P\left[(y_j \in \Delta_{if;j}^1) / R_{if;j}^1\right] = 1 - \Gamma_{if;j}^{12};$$

$$D_{if;j}^2 = P\left[(y_j \in \Delta_{if;j}^2) / R_{if;j}^2\right] = 1 - \Gamma_{if;j}^{21}.$$

Рассмотрим другие возможные варианты взаимного расположения модельных интервалов, представленные на рис. 2.

Из рис. 2,а видно, что расстояние между правой границей ℓ_{ij}^n интервала ℓ_{ij} и левой границей ℓ_{ff}^n интервала ℓ_{ff} превышает величину δ_j абсолютной погрешности устройства, измеряющего текущее значение y_j признака π_j . В этом случае, если не учитывать возможность наличия аномальных результатов измерений, можно предположить, что вероятности ошибок определения исходов проверки равны нулю. Соответственно, достоверности определения исходов проверки будут равны единице, т. е.

$$\Gamma_{if;j}^{12} = \Gamma_{if;j}^{21} = 0; \quad D_{if;j}^1 = D_{if;j}^2 = 1.$$

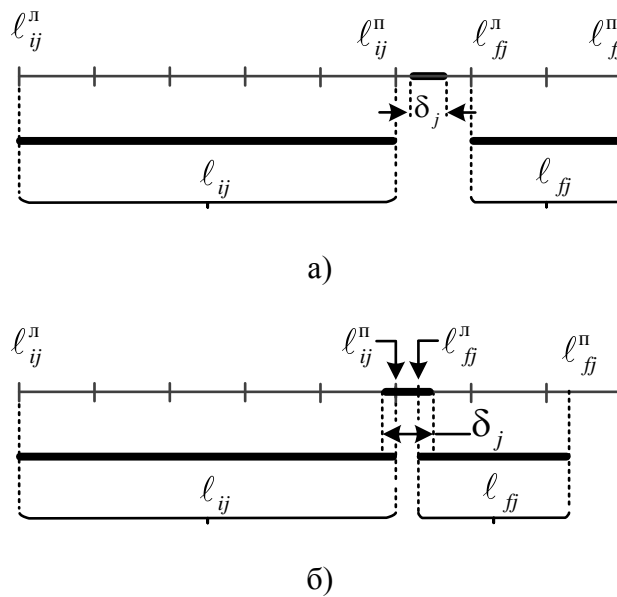


Рис. 2. Варианты взаимного расположения модельных интервалов

На рис. 2,б расстояние между правой границей ℓ_{ij}^n интервала ℓ_{ij} и левой границей ℓ_{ff}^n интервала ℓ_{ff} меньше величины δ_j абсолютной погрешности, поэтому при определении исхода

проверки возможны ошибки. Тогда вероятности этих ошибок можно определить с помощью следующих выражений:

$$\Gamma_{if:j}^{12} = P\left[\left(y_j \in \Delta_{if:j}^2\right) / R_{if:j}^1\right] = \frac{0,5\left[\delta_j - \left(\ell_{if}^n - \ell_{ij}^n\right)\right]}{\left|\ell_{ij} \cup \ell_{if}\right|};$$

$$\Gamma_{if:j}^{21} = P\left[\left(y_j \in \Delta_{if:j}^1\right) / R_{if:j}^2\right] = \frac{0,5\left[\delta_j - \left(\ell_{if}^n - \ell_{ij}^n\right)\right]}{\left|\ell_{ij} \cup \ell_{if}\right|}.$$

Эти вероятности также являются одинаковыми.

Значения априорных достоверностей определяются аналогично:

$$D_{if:j}^1 = 1 - \Gamma_{if:j}^{12}; \quad D_{if:j}^2 = 1 - \Gamma_{if:j}^{21}.$$

Таким образом, учитывая, что подынтервалы Δ_{kj}^v ($v = \overline{1, \omega_{kj}}$), характеризующие возможные исходы проверки $\hat{\pi}_j$, выполняемой в произвольном ИС R_k , как правило, значительно превосходят по своей длине величину δ_j абсолютной погрешности, можно утверждать, что ошибки в определении исходов проверки имеют ненулевую вероятность, которую можно оценить только для информационных состояний R_{kj}^v и R_{kj}^{v+1} , соответствующих соседним подынтервалам Δ_{kj}^v и Δ_{kj}^{v+1} . При этом длина отрезка на вещественной числовой оси между правой границей $(\Delta_{kj}^v)^n$ подынтервала Δ_{kj}^v и левой границей $(\Delta_{kj}^{v+1})^n$ подынтервала Δ_{kj}^{v+1} должна быть меньше величины δ_j , т. е.

$$0 \leq \left| (\Delta_{kj}^{v+1})^n - (\Delta_{kj}^v)^n \right| < \delta_j.$$

Если же подынтервалы Δ_{kj}^v «разнесены» на расстояние, превышающее величину δ_j , то вероятности ошибок определения исходов проверки можно приравнять к нулю.

Обобщая сделанные выводы, запишем окончательные выражения для оценивания априорных вероятностей Γ_{kj}^{uv} ($u, v = \overline{1, \omega_{kj}}; u \neq v$) ошибок определения исходов проверки $\hat{\pi}_j$, выполняемой в произвольном ИС R_k , которые являются недиагональными элементами матрицы (6).

Если $\left| (\Delta_{kj}^u)^n - (\Delta_{kj}^v)^n \right| \geq \delta_j$ ($u, v = \overline{1, \omega_{kj}}; u > v$), то

$$\Gamma_{kj}^{vu} = P\left[\left(y_j \in \Delta_{kj}^u\right) / R_{kj}^v\right] = \Gamma_{kj}^{uv} = P\left[\left(y_j \in \Delta_{kj}^v\right) / R_{kj}^u\right] = 0. \quad (16)$$

Если $(\Delta_{kj}^{v+1})^n = (\Delta_{kj}^v)^n$, то

$$\Gamma_{kj}^{v:v+1} = \Gamma_{kj}^{v+1:v} = \frac{0,5\delta_j}{|\nabla_{kj}|}. \quad (17)$$

Если $0 < \left| (\Delta_{kj}^{v+1})^n - (\Delta_{kj}^v)^n \right| < \delta_j$, то

$$\Gamma_{kj}^{v:v+1} = \Gamma_{kj}^{v+1:v} = \frac{0,5\left(\delta_j - \left[(\Delta_{kj}^{v+1})^n - (\Delta_{kj}^v)^n \right]\right)}{|\nabla_{kj}|}. \quad (18)$$

Значения априорных достоверностей D_{kj}^v ($v = \overline{1, \omega_{kj}}$) исходов проверки, являющихся диагональными элементами матрицы (6), определим по формуле, аналогичной (4), т. е.

$$D_{kj}^v = 1 - \sum_{\substack{u=1 \\ u \neq v}}^{\omega_{kj}} \Gamma_{kj}^{uv} \left(v = \overline{1, \omega_{kj}} \right). \quad (19)$$

После расчета априорных достоверностей исходов проверки несложно вычислить апостериорные достоверности, а также оценку достоверности самой проверки, выполняемой в произвольном информационном состоянии.

ПРИМЕР РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕДУРЫ

Оценим достоверность проверки $\hat{\pi}_j$, выполняемой в произвольном ИС R_k , на конкретном примере для следующих исходных данных: информационное состояние, в котором выполняется проверка, $R_{1-3} = \{S_1, S_2, S_3\}$; выполняемая проверка – $\hat{\pi}_1$; модельные интервалы ℓ_{i1} для ТС S_i ($i = \overline{1, 3}$): $\ell_{11} = (0, 1; 0, 3)$; $\ell_{21} = (0, 3; 0, 8)$; $\ell_{31} = (0, 4; 0, 8)$.

Иллюстрация исходов, которые можно получить при выполнении этой проверки, представлена на рис. 3.

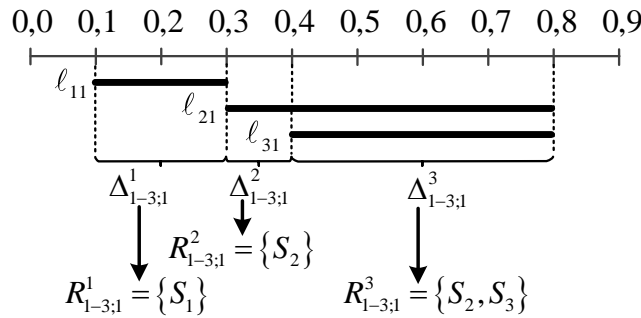


Рис. 3. Исходы проверки $\hat{\pi}_1$, выполняемой в ИС $R_{1-3} = \{S_1, S_2, S_3\}$

В соответствии с отображением (1) проверка $\hat{\pi}_1$ имеет три возможных исхода:

$$\hat{\pi}_1 : R_{1-3} \rightarrow \begin{cases} R_{1-3;1}^1 = \{S_1\}, & \text{если } y_1 \in \Delta_{1-3;1}^1 = (0, 1; 0, 3); \\ R_{1-3;1}^2 = \{S_2\}, & \text{если } y_1 \in \Delta_{1-3;1}^2 = (0, 3; 0, 4); \\ R_{1-3;1}^3 = \{S_2, S_3\}, & \text{если } y_1 \in \Delta_{1-3;1}^3 = (0, 4; 0, 8). \end{cases}$$

Используя формулу (2), вычислим их вероятности:

$$|\nabla_{1-3;1}| = |\ell_{11} \cup \ell_{21} \cup \ell_{31}| = 0,7; \quad P_{1-3}(\hat{\pi}_1^1) = \frac{|\Delta_{1-3;1}^1|}{|\nabla_{1-3;1}|} = \frac{0,2}{0,7} = 0,2857;$$

$$P_{1-3}(\hat{\pi}_1^2) = \frac{|\Delta_{1-3;1}^2|}{|\nabla_{1-3;1}|} = \frac{0,1}{0,7} = 0,1429; \quad P_{1-3}(\hat{\pi}_1^3) = \frac{|\Delta_{1-3;1}^3|}{|\nabla_{1-3;1}|} = \frac{0,4}{0,7} = 0,5714.$$

Предположим, что абсолютная погрешность измерительного устройства, посредством которого выполняется проверка, имеет значение $\delta_1 = 0,05$.

Рассчитаем значения априорных вероятностей $\Gamma_{1-3;1}^{uv} = P\left[\left(y_1 \in \Delta_{1-3;1}^v\right) / R_{1-3;1}^u\right]$ ($u, v = \overline{1, 3}; u \neq v$) ошибок, возможных при выполнении проверки и определении ее исходов.

Поскольку $(\Delta_{1-3;1}^2)^n = (\Delta_{1-3;1}^1)^n = 0,3$, а также $(\Delta_{1-3;1}^3)^n = (\Delta_{1-3;1}^2)^n = 0,4$, то согласно формуле (17)

$$\Gamma_{1-3;1}^{1;2} = \Gamma_{1-3;1}^{2;1} = \frac{0,5\delta_1}{|\nabla_{1-3;1}|} = \frac{0,5 \cdot 0,05}{0,7} = 0,0357;$$

$$\Gamma_{1-3;1}^{2;3} = \Gamma_{1-3;1}^{3;2} = \frac{0,5\delta_1}{|\nabla_{1-3;1}|} = \frac{0,5 \cdot 0,05}{0,7} = 0,0357.$$

Так как подынтервалы $\Delta_{1-3;1}^1$ и $\Delta_{1-3;1}^3$ разнесены на величину, большую δ_1 , то согласно выражению (16) $\Gamma_{1-3;1}^{1;3} = \Gamma_{1-3;1}^{3;1} = 0$.

Зная вероятности ошибок, используя формулу (19), оценим априорные достоверности $D_{1-3;1}^v = P\left[\left(y_1 \in \Delta_{1-3;1}^v\right) / R_{1-3;1}^v\right]$ ($v = \overline{1,3}$) исходов проверки:

$$D_{1-3;1}^1 = 1 - \Gamma_{1-3;1}^{2;1} - \Gamma_{1-3;1}^{3;1} = 1 - 0,0357 - 0 = 0,9643;$$

$$D_{1-3;1}^2 = 1 - \Gamma_{1-3;1}^{1;2} - \Gamma_{1-3;1}^{3;2} = 1 - 0,0357 - 0,0357 = 0,9286;$$

$$D_{1-3;1}^3 = 1 - \Gamma_{1-3;1}^{1;3} - \Gamma_{1-3;1}^{2;3} = 1 - 0 - 0,0357 = 0,9643.$$

Сформируем матрицу (6) априорных вероятностей соответствий:

$$\mathbf{P}_{1-3;1[3]}^A = \begin{bmatrix} D_{1-3;1}^1 & \Gamma_{1-3;1}^{2;1} & \Gamma_{1-3;1}^{3;1} \\ \Gamma_{1-3;1}^{1;2} & D_{1-3;1}^2 & \Gamma_{1-3;1}^{3;2} \\ \Gamma_{1-3;1}^{1;3} & \Gamma_{1-3;1}^{2;3} & D_{1-3;1}^3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,9643 & 0,0357 & 0 \\ 0,0357 & 0,9286 & 0,0357 \\ 0 & 0,0357 & 0,9643 \end{bmatrix}.$$

Используя формулу (10) и учитывая, что $P(R_{1-3}) = 1$, сформируем матрицу (8) исходов проверки:

$$\mathbf{R}_{1-3;1[3]} = \begin{bmatrix} P(R_{1-3;1}^1) & 0 & 0 \\ 0 & P(R_{1-3;1}^2) & 0 \\ 0 & 0 & P(R_{1-3;1}^3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,2857 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1429 & 0 \\ 0 & 0 & 0,5714 \end{bmatrix}.$$

Используя формулу (12), вычислим элементы матрицы (7) безусловных вероятностей соответствий:

$$\mathbf{P}_{1-3;1[3]}^B = \mathbf{R}_{1-3;1[3]} \cdot \mathbf{P}_{1-3;1[3]}^A = \begin{bmatrix} 0,2755 & 0,0102 & 0 \\ 0,0051 & 0,1327 & 0,0051 \\ 0 & 0,0204 & 0,5510 \end{bmatrix}.$$

Используя формулу (11), сформируем матрицу (9):

$$\Delta_{1-3;1[3]} = \begin{bmatrix} P(y_1 \in \Delta_{1-3;1}^1) & 0 & 0 \\ 0 & P(y_1 \in \Delta_{1-3;1}^2) & 0 \\ 0 & 0 & P(y_1 \in \Delta_{1-3;1}^3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,2806 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1633 & 0 \\ 0 & 0 & 0,5561 \end{bmatrix}.$$

Наконец, по формуле (14) сформируем матрицу (5) апостериорных вероятностей соответствий:

$$\mathbf{P}_{1-3;1[3]}^{\Pi} = \begin{bmatrix} d_{1-3;1}^1 & \gamma_{1-3;1}^{2;1} & \gamma_{1-3;1}^{3;1} \\ \gamma_{1-3;1}^{1;2} & d_{1-3;1}^2 & \gamma_{1-3;1}^{3;2} \\ \gamma_{1-3;1}^{1;3} & \gamma_{1-3;1}^{2;3} & d_{1-3;1}^3 \end{bmatrix} = \Delta_{1-3;1[3]}^{-1} \cdot [\mathbf{P}_{1-3;1[3]}^{\Delta}]^T \cdot \mathbf{R}_{1-3;1[3]} = \begin{bmatrix} 0,9818 & 0,0182 & 0 \\ 0,0625 & 0,8125 & 0,125 \\ 0 & 0,0092 & 0,9908 \end{bmatrix}.$$

Поскольку значения достоверностей исходов проверки известны, вычислим, используя формулу (15), оценку достоверности проверки $\hat{\pi}_1$, выполняемой в информационном состоянии $R_{1-3} = \{S_1, S_2, S_3\}$:

$$d_{1-3}(\hat{\pi}_1) = \sum_{v=1}^3 P_{1-3}(\hat{\pi}_1^v) d_{1-3;1}^v = 0,2857 \cdot 0,9818 + 0,1429 \cdot 0,8125 + 0,5714 \cdot 0,9908 = 0,9628.$$

Таким образом, поставленная задача решена.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целях верификации полученных результатов было проведено оценивание достоверности проверок, выполняемых в различных информационных состояниях, с помощью предложенного подхода и посредством использования методики, изложенной в работе [4]. Сравнение полученных результатов показало, что различие в оценках достоверности находится в пределах от 0,01 до 0,02 в зависимости от числа возможных исходов проверки. Таким образом, полученные результаты можно считать достоверными.

Следует отметить, что разработанный научно-методический аппарат, использующий матричную форму представления, легко масштабируется для информационных состояний, состоящих из достаточно большого числа технических состояний, что позволяет автоматизировать процесс оценивания достоверности.

Предложенный подход можно использовать при построении гибких, оптимальных по критерию максимума достоверности, программ диагностирования объектов, модельные технические состояния которых представляют собой совокупность признаков, имеющих интервальную форму представления и распределенных по равномерному закону.

Для более полного описания процессов оценивания достоверности следует разработать научно-методический аппарат, позволяющий производить аналогичные вычисления при условии, что измеряемые значения ДП имеют нормальный закон распределения внутри модельных интервалов.

Список используемых источников

1. Дмитриев А. К., Мальцев П. А. Основы теории построения и контроля сложных систем. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1988. – 192 с.
2. Кузьмин И. В. Оценка эффективности и оптимизация автоматических систем контроля и управления. – М. : Сов. радио, 1971. – 296 с.
3. Давыдов П. С. Техническая диагностика радиоэлектронных устройств и систем. – М. : Радио и связь, 1988. – 256 с.
4. Дмитриев А. К., Копкин Е. В. Оценивание достоверности проверок непрерывных диагностических признаков // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 1999. – Т. 42, № 9. – С. 3–10.
5. Кудрявцев В. В., Белозеров В. А. Достоверность диагностирования технического состояния сложных систем // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 1997. – Т. 40, № 8. – С. 38–48.

В. В. Карагодин,
доктор технических наук, профессор;
Д. Н. Прищепа,
кандидат технических наук;
Д. В. Рыбаков,
кандидат технических наук

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ НАДЕЖНОСТИ И ЖИВУЧЕСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

Надежность и живучесть систем электроснабжения, обеспечивающих электрической энергией специальные объекты наземного базирования, являются важными составляющими их качества, обеспечивающими эффективность решения специальными объектами задач по предназначению как в повседневных, так и боевых условиях. В статье рассмотрен комплексный подход к определению понятий надежности и живучести систем электроснабжения специальных объектов как больших сложных систем кибернетического типа. Определена взаимосвязь этих понятий. Отмечено, что для специальных объектов понятие надежности является внутренним комплексным свойством систем электроснабжения, характеризующим их повседневное функционирование, тогда как свойство живучести системы проявляется только при наличии внешних или внутренних воздействий (возмущений).

Ключевые слова: системы электроснабжения, надежность, виды и показатели надежности, живучесть, свойства живучести, стойкость, устойчивость и восстанавливаемость, взаимосвязь показателей.

В современных условиях успех решения задач по предназначению наземными комплексами космических войск во многом зависит от надежности и живучести их систем электроснабжения (СЭС). Все большая функциональная интеграция СЭС в состав специальных объектов усиливает зависимость качества функционирования их технических и технологических систем от качества электрической энергии, поставляемой системами электроснабжения. Это приводит к необходимости рассмотрения ряда вопросов, относящихся к обеспечению функционирования СЭС, не на уровне отдельных элементов и устройств, а на системном уровне. Надежность и живучесть систем электроснабжения – это важные составляющие их качества, которые обеспечивают эффективность решения специальными объектами задач по предназначению как в повседневных, так и боевых условиях. В связи с этим обеспечение требуемых уровней надежности и живучести СЭС является одной из важнейших задач как при создании, так и при эксплуатации любой сложной технической системы, состоящей из большого числа элементов, функционально связанных между собой.

Понятие «надежность» формировалось по мере развития таких областей науки и техники, которые определяли технический прогресс. При этом развиваемые в теории надежности методы были направлены, главным образом, на оценивание надежности отдельных систем локального характера. В то время как при решении аналогичных задач в области энергетики приходится рассматривать сложные, территориально распределенные системы, имеющие свои специфические особенности.

В общетехническом смысле, в соответствии со стандартами [1, 2], надежность – это «свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность объекта выполнять требуемые функции в заданных режимах, условиях применения, стратегиях технического обслуживания, хранения и транспортирования».

Известно, что основным назначением СЭС является обеспечение всех потребителей электроэнергией в необходимом количестве и требуемого качества. Поэтому в электроэнергетике и электроснабжении в частности надежность понимается как задача обеспечения потребите-

лей электроэнергии в необходимом количестве и требуемого качества. Именно в таком аспекте даются определения надежности различными специалистами-энергетиками [3–9].

В специальной литературе существует большое количество определений надежности СЭС, каждое из которых отражает мнение определенного автора и имеет право на существование. В подходах к трактовке понятия надежности технических систем, включая и системы электроснабжения, надежность отождествляется прежде всего с сохранением работоспособности.

Современные и перспективные системы электроснабжения обладают особенностями, которые выделяют их среди других технических систем. К особенностям построения и функционирования СЭС можно отнести следующие:

- схемы СЭС имеют в своем составе большое количество различных по назначению и устройству элементов, функционально связанных между собой, что делает СЭС системой большой размерности;
- производство, передача, распределение и потребление электроэнергии представляет собой единый, неразрывный во времени процесс;
- необходимую для решения задач надежности статистическую информацию практически невозможно получить в лабораторных и заводских условиях из-за трудностей воспроизведения реальных условий работы оборудования и установления показателей, определяемых с помощью терминов, относящихся к временным понятиям.

Приведенные особенности делают сомнительным возможность прямого применения положений теории надежности технических систем к вопросам исследования надежности системы электроснабжения и требуют их уточнения и при необходимости расширения показателей надежности и критериев работоспособности.

Необходимо отметить, что система электроснабжения приобретает свои свойства как на стадии создания, так и на стадии эксплуатации. На стадии создания СЭС (рис. 1) формируется свойство конструктивной надежности системы, определяемое как принципами построения самой системы, так и конструкцией отдельного ее оборудования, входящего в состав СЭС.

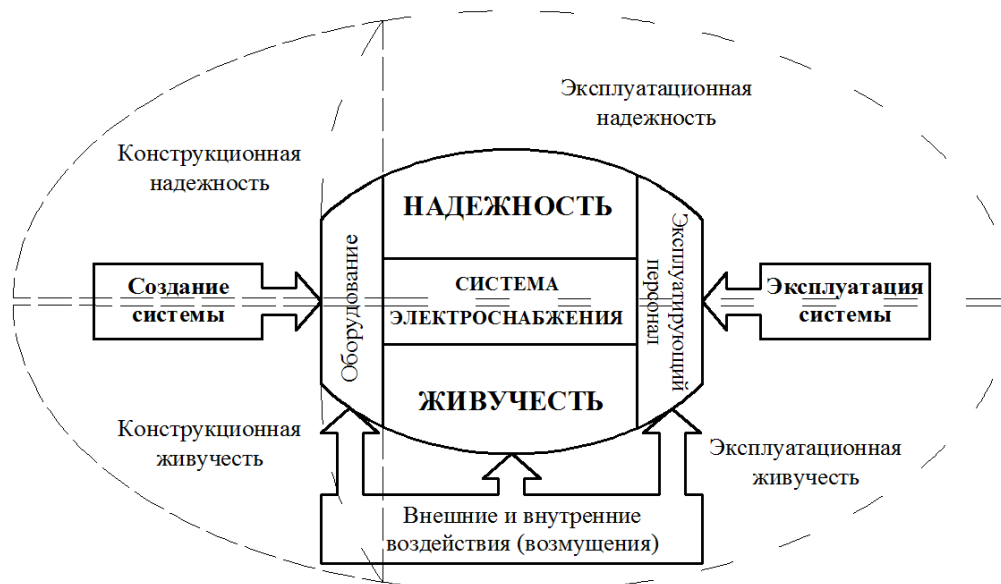


Рис. 1. Взаимосвязь понятий надежности и живучести систем электроснабжения специальных объектов

На стадии эксплуатации системы формируется и поддерживается на установленном уровне свойство так называемой эксплуатационной надежности, дополняющее конструктив-

ную надежность системы. Это свойство определяется рациональным и эффективным взаимодействием технического и человеческого компонентов системы.

Таким образом, надежность СЭС, как сложной, многоуровневой системы, следует рассматривать с двух точек зрения. С одной стороны, СЭС является технической системой, надежность которой определяется надежностью составляющего ее оборудования. С другой стороны, надежность СЭС рассматривается как способность «объекта выполнять заданные функции в заданном объеме при определенных условиях функционирования» [10]. В связи с этим и возникающие в СЭС отказы можно также разделить на два вида: отказы работоспособности отдельного элемента (элементов), которые не обязательно влекут за собой отказ функционирования всей системы, и отказ функционирования системы, который может иметь место даже при полной работоспособности системы в случае неудовлетворения требований потребителей электроэнергии.

Следовательно рассматривать вопросы исследования надежности СЭС, как объекта энергетики, можно с использованием общетехнической теории надежности и с позиции надежности ее функционирования. Отсюда следует возможность и необходимость условного разделения понятия эксплуатационной надежности СЭС на составляющие: структурную (аппаратную) надежность и функциональную (режимную) надежность.

При исследовании вопросов структурной (аппаратной) надежности СЭС система представляется в виде структуры, состоящей из функционально связанных элементов. В данном случае надежность определяется как комплексное свойство, которое может включать в себя свойства безотказности, ремонтпригодности, восстанавливаемости, долговечности, сохраняемости, готовности или определенные их сочетания [2]. Таким образом, структурная (аппаратная) надежность СЭС подлежит рассмотрению в рамках общетехнической теории надежности. Для количественной характеристики указанных свойств надежности используются единичные и комплексные показатели. Многие из показателей надежности указанных свойств имеют строгое понятийное содержание, развитый математический аппарат расчетных и экспериментальных методов оценки [4–9, 11].

При рассмотрении функциональной (режимной) надежности необходимо учитывать взаимосвязь надежности электроснабжения и качества электроэнергии (по частоте, напряжению и другим параметрам). Очевидным является утверждение, что обеспечить высокое качество электроэнергии для потребителей при низкой надежности СЭС невозможно в принципе. С другой стороны, низкое качество электроэнергии, в свою очередь, снижает надежность оборудования как конечных потребителей, так и СЭС. Возникает замкнутый круг: при низкой надежности электроснабжения имеет место низкое качество электроэнергии, которое вызывает повышенную аварийность оборудования, что усугубляет низкую надежность электроснабжения и приводит к дальнейшему снижению качества электроэнергии или углублению дефицита мощности.

Следовательно, при рассмотрении функциональной (режимной) надежности снижение количества и (или) качества электроэнергии, отдаваемой потребителю, по сравнению с заданными значениями можно рассматривать как отказ или нарушение условий функционирования СЭС. Для оценки функциональной (режимной) надежности СЭС могут использоваться показатели, характеризующий баланс мощностей в системе, качество электрической энергии, поступающей к потребителю, и другие показатели, определяемые исследователем.

Система электроснабжения специального объекта является неотъемлемой частью энергосистемы. Нормальные и аварийные режимы энергосистемы и системы электроснабжения специального комплекса тесно связаны друг с другом.

При возникновении внутренних и (или) внешних воздействий на СЭС или возмущений в СЭС появляется свойство противостоять этим воздействиям (возмущениям), сохраняя или восстанавливая работоспособность (см. рис. 1). Данное свойство получило название живучести.

Под живучестью в соответствии с ГОСТом [2] понимают «свойство объекта, состоящее в его способности противостоять развитию критических отказов из дефектов и повреждений при установленной системе технического обслуживания и ремонта, или свойство объекта сохранять работоспособность при воздействиях, не предусмотренных условиями эксплуатации, или свойство объекта сохранять работоспособность при наличии дефектов или повреждений определенного вида, а также при отказе некоторых компонентов».

По отношению к специальным объектам не существует единого подхода к определению живучести СЭС и нормативных документов, определяющих конкретные методики расчетов уровней живучести. Под живучестью СЭС специального объекта следует понимать ее способность выполнять свои функции и сохранять свои параметры в установленных пределах, то есть сохранять работоспособное состояние, во время и после воздействия на систему внешних и внутренних возмущений, не предусмотренных условиями нормальной эксплуатации.

На стадии создания СЭС формируется свойство конструктивной живучести системы, определяемое стойкостью отдельного ее оборудования (элементов), входящего в состав СЭС, к расчетным внешним и внутренним воздействиям (возмущениям). На стадии эксплуатации системы формируется и поддерживается на установленном уровне за счет рационального и эффективного применения комплекса технических и организационных мероприятий свойство так называемой эксплуатационной живучести, дополняющее конструктивную.

По характеру воздействий (возмущений) живучесть СЭС можно разделить на структурно-функциональную и боевую. Под структурно-функциональной живучестью СЭС необходимо понимать способность СЭС выполнять заданные функции при нарушении работоспособности (повреждении) отдельных ее элементов, не допуская каскадного развития аварии с массовым нарушением электроснабжения потребителей. Под боевой живучестью СЭС – свойство СЭС сохранять или своевременно восстанавливать способность выполнять заданные функции во время и после воздействия по объекту поражающих факторов современных видов боеприпасов. В связи с тем, что технические и технологические системы специальных объектов не могут функционировать без обеспечения их электрической энергией, живучесть СЭС таких объектов является их важнейшим свойством.

Надежность и живучесть СЭС специальных объектов взаимосвязаны между собой. Связь между данными понятиями и характеризующие их показатели представлены на рис. 2. Так, понятие безотказности близко к понятиям стойкости и устойчивости, свойство ремонтпригодности – к свойству восстанавливаемости.

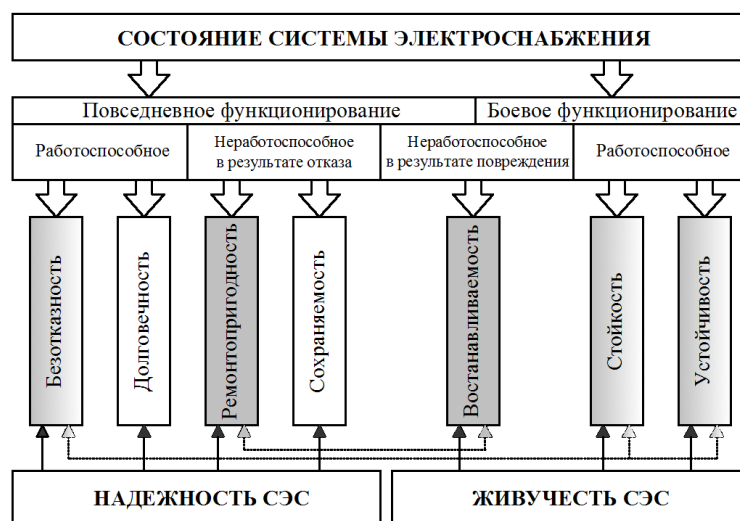


Рис. 2. Взаимосвязь показателей надежности и живучести систем электроснабжения специальных объектов

Принципиальное отличие понятий обуславливается двумя обстоятельствами:

– надежность СЭС и ее составляющие определяются отказами в системе на относительно длительных временных интервалах, в то время как живучесть СЭС и ее составляющие определяются наличием (отсутствием) боевых или технических повреждений на относительно коротких временных интервалах;

– составляющие надежности СЭС зависят только от свойств самой системы, составляющие живучести СЭС представляют собой свойства, характеризующие реакцию системы на среду, т. е. на внешние или внутренние воздействия (возмущения).

Основное их отличие заключается в том, что для специальных объектов понятие надежности является внутренним комплексным свойством СЭС, характеризующим их повседневное функционирование, тогда как свойство живучести системы проявляется только при наличии внешних или внутренних воздействий (возмущений), например, таких как воздействие средств поражения противника, стихийных бедствий и т. п.

Применительно к рассматриваемым объектам понятие живучести может быть представлено как совокупность комплексных свойств: стойкости, устойчивости и восстанавливаемости.

Под **стойкостью** понимается способность СЭС сохранять свойства, необходимые для выполнения заданных функций, при случайных отказах/восстановлениях элементов в условиях достоверного возникновения поражающих факторов (возмущений).

Устойчивостью называется способность СЭС возвращаться в исходное состояние (нормальный или близкий к нему режим функционирования) после прекращения воздействия (возмущения). Основным показателем устойчивости является некоторый предел внешнего или внутреннего воздействия (возмущения), после превышения которого возвращение системы в нормальный или близкий к нему режим функционирования не происходит.

Необходимо отметить, что нарушение устойчивости может произойти при аварийных изменениях структуры СЭС и установленных (нормальных) режимов функционирования ее оборудования (отключение или несанкционированное включение автономных источников электрической энергии, линий электропередачи, перегрузка трансформаторов и т.д.) без повреждения оборудования СЭС.

Восстанавливаемостью называется свойство СЭС и ее элементов, характеризующее возможности системы восстановить нарушения ее стойкости и устойчивости. Наличие свойства восстанавливаемости позволяет существенно повысить живучесть системы, обладающей недостаточной стойкостью и устойчивостью. Основным показателем восстанавливаемости является среднее время восстановления повреждений.

Таким образом, надежность и живучесть СЭС представляют собой комплексные свойства, характеризующие взаимодействие системы электроснабжения с внешней средой и требуют для своей оценки выявления влияющих на нее факторов. Кроме того, возникают трудности в формализации, выборе показателей и оценке, поэтому определение надежности и живучести СЭС необходимо рассматривать в комплексе.

Список используемых источников

1. ГОСТ 27.101-2021. Надежность в технике. Надежность выполнения задания и управления непрерывностью деятельности. Термины и определения. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200181140?ysclid=lmg3ua0q1b169922195> (дата обращения: 25.05.2023).

2. ГОСТ 27.102-2021. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200181141?ysclid=lmg40j9020510635899> (дата обращения: 25.05.2023).

3. Савоськин Н. Е. Надежность электрических систем : учеб. пособие. – Пенза : Пензенский гос. ун-т, 2004. – 101 с.

4. *Обоскалов В. П.* Структурная надежность электроэнергетических систем : учеб. пособие. – Екатеринбург : УрФУ, 2012. – 194 с.
5. *Шеметов А. Н.* Надежность электроснабжения: учеб. пособие для студентов специальности 140211 «Электроснабжение». – Магнитогорск : ГОУ ВПО «МГТУ им. Г. И. Носова», 2006. – 141 с.
6. *Волков Н. Г., Сивков А. А., Сайгаиш А. С.* Надежность электроснабжения : учеб. пособие. – 2-е изд., доп. – Томск : Изд-во Томского политехн. ун-та, 2011. – 160 с.
7. *Папков Б. В., Илюшин П. В., Куликов А. Л.* Надежность и эффективность современного электроснабжения : моногр. – Н. Новгород : научно-издательский центр «XXI век», 2021. – 160 с.
8. *Савина Н. В.* Надежность систем электроэнергетики : учеб. пособие. – Благовещенск : Амурский гос. ун-т, 2011. – 269 с.
9. *Савина Н. В.* Надежность электроэнергетических систем : учеб. пособие. – Благовещенск : Амурский гос. ун-т, 2014. – 194 с.
10. *Манов Н. А.* Методы и модели исследования надежности электроэнергетических систем. – URL: <http://www.twirpx.com/file/345534> (дата обращения: 12.02.2018).
11. *Пешехонов Н. Е.* Электроснабжение специальных комплексов : учеб. пособие. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2011. – 187 с.

В. В. Козлов,
доктор технических наук, профессор;
А. В. Лагун,
кандидат технических наук, доцент;
В. А. Харченко

ИНТЕГРАЛЬНОЕ КАЧЕСТВО МЕХАНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В СИСТЕМЕ ОЦЕНИВАНИЯ ОБЛИКА КОСМИЧЕСКОГО РАКЕТНОГО КОМПЛЕКСА

В данной статье изложены и обоснованы основные принципы оценивания облика космического ракетного комплекса по совокупности нескольких критериев, обобщенных в интегральный показатель качества, для входящих в его структуру механических объектов. Кроме того, в статье изложены подходы для оценки их структурного совершенства, устойчивости, управляемости и самоорганизации.

Ключевые слова: механические объекты космического ракетного комплекса, космический ракетный комплекс, структурное совершенство, управляемость, самоорганизация, устойчивость, показатель качества, облик космического ракетного комплекса, интегральное качество.

ВВЕДЕНИЕ

Новые космические ракетные комплексы (КРК) должны создаваться не только за счет совершенствования проработанных технических решений, но и посредством применения новых технологических процессов, а также новых базовых элементов. Элементы комплекса и связи между ними должны появиться после решения задач по эффективному достижению поставленных перед КРК целей. Поэтому модели должны иметь формализованные рекомендации, направленные не только на свою структуру, но и на уточнение неформальных предписаний заказчиков путем детализации своих потенциальных возможностей. Математические модели должны быть ориентированы на получение знаний о методах оптимального построения КРК на основе уже достигнутых результатов в технике и технологии подготовки к пуску, пуска и выведения космических аппаратов (КА). Они предназначены для описания структур, состояний и процессов функционирования комплекса. В то же время модели должны способствовать генерации новых физических идей и способов их реализации для перспективных комплексов.

Оставшаяся в прошлом (1957) политическая концепция «выведение КА любой ценой», использованная для первого КРК, сегодня не приемлема. Современная концепция создания КРК должна основываться на использовании понятия эффективности.

Набор требований, назначаемый для механических объектов КРК, как правило, носит ограниченный характер. Это обстоятельство может быть расценено, с одной стороны, как объективное желание для заказчика решить только свои задачи, а с другой стороны, – как незнание всех свойств будущего комплекса или желание назначать только те требования, которые возможно проверить. В силу этого требования задаются фрагментарно для некоторых уровней иерархии комплекса, при этом их формулировки могут быть записаны в нечетких лингвистических шкалах. Основываясь только на таких требованиях, невозможно однозначно сформировать комплекс с желаемым качеством. Поэтому целесообразным является введение нескольких уровней качества, возможно, даже не назначенных заказчиком, но обеспечивающих оценивание всех основных свойств механических объектов комплекса.

Оценивание таких свойств осуществляется с помощью принятых уровней качества, а именно [2]:

- устойчивость;
- помехоустойчивость;
- управляемость;
- способность;
- самоорганизация.

Из указанных выше свойств для механических объектов КРК наибольшее значение имеют устойчивость, управляемость, самоорганизация, а также его структурное совершенство.

СТРУКТУРНОЕ СОВЕРШЕНСТВО МЕХАНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ КРК

При создании механических объектов КРК принцип наименьшего действия (принцип Гамильтона) может быть истолкован как минимизация потребляемых ресурсов на выполнение заданных функций КРК (принцип оптимальности). Следовательно, интегральное качество может быть представлено многомерным вектором, оцениваемым критерием оптимальности:

$$O : \bigcap_{i=1}^n (x_{i,j} \in \{x_i^d\}) \cap \bigcap_{K \in K_0} (x_{kj} = x_k^{opt}) \cong U,$$

- где x_1^{opt} – скалярный показатель целевой эффективности (конструктивных и режимных параметров);
 x_2^{opt} – показатель оптимальности структурно-топологических свойств;
 x_3^{opt}, x_4^{opt} – показатели функциональных свойств (управляемости и самоорганизованности);
 x_5^{opt} – показатель устойчивости.

Для оценивания структур механических объектов на разных уровнях исследования предлагается использовать понятие структурного совершенства.

Совокупность механических объектов КРК, обладающих минимально необходимой структурой, можно считать структурно совершенной [6].

Оценивание структурного совершенства для механических объектов комплекса в целом возможно при использовании в его графовых моделях хроматического числа – $\chi(G)$ (задачи по определению оптимального числа агрегатов КРК). Кроме того, структуру агрегата можно считать совершенной, если его модель в виде графа соответствует двудольному взвешенному графу (G), имеющему совершенное паросочетание, оцениваемому по степени валентности его вершин $\deg_{(G)} V$ [7].

Оценивание структурного совершенства для агрегатов успешно выполнимо при использовании степени совершенства паросочетания (M), насыщающей все вершины графа (G) структуры агрегата.

УСТОЙЧИВОСТЬ МЕХАНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ КРК

Устойчивость как понятие имеет несколько трактовок. Наибольшую применимость имеет понятие устойчивости как динамической характеристики системы управления.

Устойчивость – свойство системы возвращаться в исходный или близкий к нему установившийся режим после выхода из него в результате каких-либо внешних воздействий [3].

Однако известны и другие понятия устойчивости:

1. Устойчивость реакции систем.
2. Устойчивость траекторий.
3. Устойчивость множеств:

– некоторого заданного элемента по отношению к другим элементам (по Ляпунову);

- некоторого множества относительно самого себя (по Пуассону);
- решений системы обыкновенных дифференциальных уравнений, при этом различают:
 - устойчивость положения равновесия;
 - устойчивость периодических решений.

4. Устойчивость структурная (морфология систем).

По Ляпунову решение $y_i = y_i(t)$ ($i=1, 2, \dots, n$) системы дифференциальных уравнений вида

$$\frac{dy_i}{dt} = f_i(t; y_1, y_2, \dots, y_n) \quad (i=1, 2, \dots, n),$$

соответствующее начальным условиям $y_i(t_0) = y_{i0}$, называется устойчивым, если для любого $\varepsilon > 0$ существует такое $\delta = \delta(\varepsilon) > 0$, которое при $|x_{i0} - y_{i0}| < \delta$ будет удовлетворять условию $|x_i(t) - y_i(t)| < \varepsilon$ для всех $t \geq t_0$, где $x_i(t)$ – решение, определяемое начальными условиями $x_i(t_0) = x_{i0}$.

Таким образом, при незначительных изменениях начальных условий решение также будет изменяться незначительно.

Устойчивость, в смысле Ляпунова, подразумевает существование функции Ляпунова. Функции Ляпунова для частных решений не единственны, и практические методы их поиска являются скорее искусством, чем наукой [5].

С учетом того, что иерархия КРК как системы в своем основании имеет уровень конструкционных материалов, естественно можно предположить, что под первичным (обязательным) понятием устойчивости комплекса следует понимать условие упругости напряженно-деформационного состояния для конструкционных материалов агрегатов и систем комплекса. При такой трактовке этого понятия с уверенностью можно утверждать, что показатель устойчивости может иметь двоичный код, и, кроме того, устойчивость или упругость напряженно-деформационного состояния для конструкционных материалов агрегатов и систем комплекса всегда может быть как достигнута, так и измерена. В то же время практика создания и эксплуатации КРК показывает, что это условие не соблюдается. Для оценивания устойчивости, понимаемой здесь как условие прочности, возможно использовать условие пластичности в форме Мизеса (или Треска сен Венана) [6], записанное для главных напряжений и предела текучести

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \leq 2\sigma_T^2; \quad \sigma_T = \sigma_T(t^0).$$

Несоблюдение данного условия для существующих комплексов приводит к значительному сокращению ресурса их основных агрегатов. Работа металлоконструкций в условиях пластических деформаций порождает дополнительные (не целевые) проблемы по оцениванию и увеличению остаточного ресурса, надежности и долговечности как технологического оборудования, так и ракеты-носителя (РН). В связи с этим в состав комплекса вводятся всё новые системы и агрегаты, иногда также работающие в режимах значительных потерь работоспособности, что делает задачу бесконечной по ресурсоемкости.

УПРАВЛЯЕМОСТЬ МЕХАНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ КРК

Управляемость гарантирует возможность достижения любой заданной оценки $v \in V$ при любых внешних условиях, т. е. при любых $u \in U$ [4]. Поэтому для определения желаемого поведения системы необходимо вводить оценочную функцию либо соответствующий показатель качества. Таким образом, понятия в категории управляемости будут однозначно определены. В классической теории эти функции в явном виде не фигурируют. В теории управляемости линейность уравнений, по сути дела, превращает достаточные условия в необходимые и достаточные.

Для динамической системы к задаче управления относятся операции, связанные с систематизированным и наиболее желательным изменением состояния. Характеристикой таких динамических систем являются n переменных состояний систем $x_1(t), x_2(t), x_3(t), \dots, x_n(t)$, ко-

торые удовлетворяют n дифференциальным уравнениям первого порядка, характеризующим состояние системы.

Данные дифференциальные уравнения можно записать в виде

$$\frac{dx_i}{dt} = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_n)$$

В этом случае обобщенные координаты и скорости – это переменные состояния, а независимой переменной является время t .

Определение r управляющих переменных $u_k = u_k(t)$ ($k = 1, 2, \dots, r$) как функций от времени (t) в интервале $t_0 \leq t \leq t_F$ при минимизации заданных критериев качества можно считать задачей управления, выраженной следующим образом:

$$x_0(t_F) = \int_{t_0}^{t_F} f_0(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_n) dt$$

Данное выражение должно удовлетворять неравенствам, которые определяют замкнутую область допустимых управлений U . Эти неравенства имеют вид

$$Q_j(u_1, u_2, \dots, u_r) \leq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, N)$$

Выбор оптимальной траектории $x_i = x_i(t)$ в случае n -мерного пространства напрямую зависит от выбора наиболее оптимального управления $u_k(t)$ [1]. Для решения этой задачи, связанной с управлением, нужно задать удобные граничные условия, которые позволят определить начальные и конечные условия: $x_i = x_i(t_0)$, $x_i = x_i(t_F)$. При этом значения t_0 , t_F , которые являются начальным и конечным временами, могут быть независимыми.

Трактовка критерия-функционала заключается в представлении его конечным значением $x_0(t_F)$ для дополнительной переменной состояния $x_0(t)$, при удовлетворении следующего уравнения:

$$\frac{dx_0}{dt} = f_0(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_n),$$

при котором должно выполняться начальное условие $x_0(t_0) = 0$.

Данная трактовка позволяет сформулировать понятие критерия-функционала.

В случае определения условия оптимального управления необходимо использовать принцип Понтрягина. Процесс оптимального управления непосредственно связан с минимизацией критерия-функционала. Он реализуется с помощью изменения допустимых управляющих переменных $u_k = u_k(t)$. Это максимизирует гамильтонову функцию следующего вида:

$$H(x_1, x_2, \dots, x_n; p_1, p_2, \dots, p_n; u_1, u_2, \dots, u_r) = \sum_{i=0}^n p_i f_i$$

Причем изменения происходят для каждого t между t_0 и t_F .

В указанном случае сопряженные переменные $p_0(t)$, $p_1(t)$, ..., $p_n(t)$ должны определяться как решение $(n+1)$ дифференциальных уравнений первого порядка

$$\frac{dp_i}{dt} = - \sum_{k=0}^n \frac{\partial f_k}{\partial x_i} p_k \quad (i = 0, 1, 2, \dots, n; t_0 < t < t_F), \text{ где } p_0(t) = \text{const} \leq 0.$$

Для n уравнений Эйлера

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial F}{\partial x_i'} \right) - \frac{\partial F}{\partial x_i} = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n).$$

Эти уравнения эквивалентны $2n$ уравнениям первого порядка

$$x_i' = \frac{\partial H}{\partial p_i}, \quad p_i' = - \frac{\partial H}{\partial x_i}, \quad i = 1, 2, \dots, n \text{ относительно } 2n \text{ функций } x_i \text{ и } p_i = \frac{\partial F}{\partial x_i}.$$

В данных функциях рассматривается следующая система уравнений:

$$\left. \begin{aligned} H(x_1, x_2, \dots, x_n; p_1, p_2, \dots, p_n; t) \equiv \\ \sum_{i=1}^n p_i x'_i - F(x_1, x_2, \dots, x_n; x'_1, x'_2, \dots, x'_n; t) \\ \det[F'_{x_i x_k}] \neq 0 \end{aligned} \right\}$$

Эта система уравнений называется канонической системой уравнений Эйлера.

Для классической динамики характерно рассматривать канонически сопряженные или присоединенные переменные p_i в качестве обобщенных моментов. Гамельтонова функция H при этом рассматривается как энергия и имеет ее размерность.

Увеличение данной функции до максимума влечет за собой следующий результат:

$$\frac{\partial H}{\partial u} = 0.$$

В этом случае u является управляющей переменной.

Таким образом, принцип максимума подразумевает выполнение необходимых условий, которые недостаточны для оптимального управления. Тогда метод Понтрягина позволит получить несколько вариантов оптимального решения. Если эту задачу таким образом решить нельзя, то это говорит о том, что решение найти невозможно [1].

Так как основной целью управления является использование максимальных потенциально возможных характеристик системы, необходимых для выполнения поставленной задачи, то управление системой будет более эффективно, если значение показателя ее эффективности выполненной операции E_f максимально приближено к его предельному значению [2].

Для показателя эффективности

$$E_f = E_f(q, A, t),$$

где q – показатели полезного эффекта;

A – затраченные ресурсы;

t – затраченное время;

E_f – коэффициент эффективности.

Эффективность управления может быть оценена минимумом затрат ресурсов (A) в назначенные сроки при безусловном достижении назначенного целевого эффекта. Откуда следует, что управляемость может быть оценена минимумом ресурсопотребления на организацию процесса управления путем вычисления критерия-функционала, а кроме того, достижение желаемой управляемости соответствует максимальному значению показателя целевой эффективности.

Практика создания РКК, к сожалению, игнорирует рекомендации по достижению указанного важнейшего свойства.

САМООРГАНИЗОВАННОСТЬ МЕХАНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ КРК

Самоорганизованность является качеством, присущим системам наибольшей сложности. Эти системы обладают возможностью изменения как своей структуры, так и своих параметров, а также способны изменять процесс своего функционирования для достижения цели повышения эффективности функций, которыми она обладает.

Система, имеющая возможность самоорганизовываться, обладает свойствами принципиального характера, к которым можно отнести как свободу выбора решения, так и способность к адаптации к различным ситуациям, а также самообучаемость и распознавание ситуаций.

Принцип, состоящий в свободе выбора решений, включает в себя возможность выбора как единственно правильного решения, так и нескольких вариантов решений. Изменение ситуации при этом должно позволять при совершении определенного шага вернуться к предыдущему состоянию, изменив выбранное ранее решение, таким образом, оставить свободу выбора принятия решения в дальнейших шагах [2].

При решении задачи функционирования целенаправленных процессов обладание возможностью возврата к предыдущему шагу, изменив при этом предыдущее решение, или обладание возможностью свободного выбора решения может быть истолковано как обратимость операций технологического процесса подготовки и пуска РКН для механических объектов КРК.

Обратимость целенаправленного технологического процесса для механических объектов КРК может быть рассмотрена как самоуправляемость или *абсолютная устойчивость «движения»* комплекса и его объектов к поставленной цели.

Для построения оценочной функции самоорганизованности механических объектов можно воспользоваться понятием о функции Лагранжа (L). Поскольку КРК является замкнутой системой, то энергия (E) определяется следующим соотношением:

$$E = \sum_i q \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - L \quad (1)$$

при этом

$$L = T(q, \dot{q}) - \Pi(q), \quad (2)$$

где T и Π – кинетическая и потенциальные энергии системы, определяемые выражениями:

$$T = \frac{1}{2} \sum_{j,k=1}^s a_{jk} \dot{q}_j \dot{q}_k;$$

$$\Pi = \frac{1}{2} \sum_{j,k=1}^s a_{jk} q_j q_k.$$

Здесь a_{ik}, c_{jk} – постоянные коэффициенты;
 q_j, q_k – обобщенные координаты;
 \dot{q}_j, \dot{q}_k – обобщенные скорости.

Согласно теореме Эйлера об однородных функциях, справедливо равенство

$$\sum_i \dot{q}_i \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} = \sum_i \dot{q}_i \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} = 2T.$$

Подставляя полученные значения в выражение (1), получим равенство, используемое в классической механике, в следующем виде:

$$E = T + U,$$

где U – внутренняя энергия.

При движении механических объектов в среде происходит процесс замедления движения данного объекта за счет воздействия на него силы сопротивления окружающей его среды. В результате энергия движения механических объектов в итоге рассеивается, теряя при этом свои значения. В таких условиях при анализе процесса их движения необходимо учитывать состояние тепла как для объектов, так и для среды, которая его окружает. В данном случае необходимо использовать при анализе процесса движения законы термодинамики, позволяющие учитывать выделение тепла в процессе взаимодействия тела со средой. Такой процесс можно описать следующим выражением:

$$E = T + U + Q,$$

где Q – энергия в виде выделенного тепла при взаимодействии тела и среды.

Механические объекты КРК, совершая работу, выделяют тепло, которое, в свою очередь, выделяется в окружающую его среду. Данная энергия для них считается потерянной безвозвратно. Поэтому при решении вопросов проектирования агрегатов КРК, в своем составе

имеющих механические элементы, необходимо минимизировать необратимый процесс рассеивания энергии при функционировании агрегатов.

При этом уравнение Лагранжа имеет вид

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial (T - \Pi)}{\partial q_i} = Q_i \quad i = 1, \dots, s.$$

Вместе с тем обобщенный процесс для механических объектов КРК может быть представлен в следующем виде:

$$a_j \ddot{\xi}_j + b_j \dot{\xi}_j + c_j \xi_j = Q_i(t) \quad j = 1, \dots, s \quad (3)$$

Такая запись уравнений возможно в случае выбора новых обобщенных координат ($j = 1, 2, \dots, 6$). Эти координаты могут быть представлены следующими выражениями:

$$T = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^s a_j \dot{\xi}_j^2; \quad \Pi = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^s c_j \xi_j^2; \quad \Phi = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^s b_j \dot{\xi}_j^2.$$

В этом случае оценивание функционирования элементов РКК, в которых используются механические конструкции, сводится к анализу уравнения Лагранжа в виде (3). Вместе с тем для выбора оптимальной схемы агрегата необходимо оценивать как качество выполненных этим агрегатом движений, так и количество характеризующих его показателей.

Принятие решений о выборе конструктивно-компоновочных схем механических объектов КРК целесообразно проводить на основе исследования их самоорганизованности движения, понимая под этим абсолютную устойчивость движения как свойство, не требующее дополнительного расходования энергии на работу системы управления.

Исследования устойчивости движения агрегата удобно проводить по одному дифференциальному уравнению (3) второго порядка относительно обобщенной координаты ξ . Тогда можно записать:

$$\xi_{\text{в}} = \xi + \xi_{\text{с}},$$

где $\xi_{\text{в}}$ – координаты возмущенного движения системы;

$\xi_{\text{с}}$ – решение соответствующего однородного дифференциального уравнения при начальных условиях, соответствующих моменту возмущения.

Решение данного уравнения определяется общеизвестными методами математического анализа и связано со значениями корней характеристического уравнения вида $ar^2 + br + c = 0$.

Каждому вещественному корню r_j соответствует $\xi_j = c_j e^{r_j t}$.

Каждой паре сопряженных комплексных корней $r_k = \alpha_k \pm i\lambda_k$ соответствует слагаемое

$$\xi_k = e^{\alpha_k t} (C_{1k} \cos \lambda_k t + C_{2k} \sin \lambda_k t).$$

При возрастании абсолютной величины какого-либо слагаемого решения возрастает сумма в целом. Очевидно, что достаточным условием неограниченного возрастания значений $\xi_{\text{с}}$ является наличие одного положительного вещественного корня r_j или одной пары сопряженных комплексных корней с положительной вещественной частью $\alpha_k > 0$. В противном случае, при наличии у всех корней характеристического уравнения отрицательной вещественной части, движение асимптотически устойчиво. Примечательно, что данное условие справедливо как для линейных, так и для линеаризованных уравнений независимо от членов, которые выше первого порядка малости. Вместе с тем в случае нулевых или чисто мнимых корней линеаризованного уравнения требуются дополнительные исследования.

Большинство механических систем КРК имеют в уравнении, описывающем их движения, нелинейность, которую следовало бы линеаризовать.

Нелинейность в уравнениях движения возникает или вследствие нелинейности зависимости инерционных коэффициентов от обобщенных сил, или вследствие нелинейных характеристик сил, действующих на системы.

Источниками нелинейности служат люфты и зазоры в конструкциях агрегатов, характеристика сил трения при сухом или граничном трении, в некоторых случаях деформации механических систем сопровождаются заметной диссипацией энергии, связанной с действием сил упругого сопротивления, что приводит к петлям гистерезиса при цикле нагрузка.

В основе метода оценивания самоорганизованности движения механических агрегатов КРК лежит теория устойчивости движения А. М. Ляпунова, к которой прибегают в случае невозможности (нежелательности) линеаризации. Для этого исследуется динамическая передаточная функция механической системы $W(\xi)$, являющейся отношением изображения по Лапласу обобщенной координаты ξ в линеаризованном уравнении движения к изображению обобщенной силы.

Для получения выражения $W(s)$, ($s=a+ib$), как известно, выполняют преобразования, которые позволяют переписать выражение $a\ddot{\xi} + b\dot{\xi} + c\xi = Q(t)$ в следующем виде

$$T_2^2 \ddot{y} + T_1 \dot{y} + y = kx,$$

$$\text{где } y = \frac{\xi}{\xi_H}; \quad x = \frac{Q(t)}{Q}; \quad T_2^2 = \frac{a}{c}; \quad T_1 = \frac{b}{c}; \quad k = \frac{Q_H}{c\xi_H};$$

Здесь ξ_H, Q_H – нормированные (средние, максимальные и т. д.) значения ξ и Q .

Подставляя в полученное соотношение изображение по Лапласу \ddot{y}, \dot{y} и x , получают

$$T_2^2 [s^2 Y(s) - sy_0 - \dot{y}_0] + T_1 [sY(s) - y_0] + Y(s) = kX(s),$$

где $Y(s), X(s)$ – изображение функций $y(t)$ и $x(t)$;

y_0, \dot{y}_0 – начальные значения функций y и ее первой производной по времени, $s = \beta + i\gamma$.

Поскольку β и γ – постоянные, то

$$Y(s) = \frac{T_2^2 (sy_0 + \dot{y}_0) + T_1 y_0 + kX(s)}{T_2^2 s^2 + T_1 s + 1}.$$

Тогда динамическая передаточная функция $W(s)$ определится как отношение изображений функции $Y(s)$ к $X(s)$ при нулевых начальных условиях ($\dot{y}_0=0, y_0=0$):

$$W(s) = \frac{k}{T_2^2 s^2 + T_1 s + 1}.$$

Ее значение не зависит от закона изменения безразмерной обобщенной силы $x(t)$ и начальных условий, и, следовательно, $W(s)$, где согласно преобразованиям Лапласа $s = a + bi$, является характеристикой механической системы, определяющей ее динамические свойства. Записав динамическую передаточную функцию в виде

$$W(j\omega) = W(s)|_{s=j\omega},$$

где ω – круговая частота ($0 < \omega < +\infty$), круговую частоту можно разложить на следующие две составляющие:

$$W(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega),$$

причем

$$U(\omega) = \operatorname{Re} W(j\omega); \quad V(\omega) = \operatorname{Im} W(j\omega),$$

где $|W(j\omega)| = A(\omega)$ – амплитудно-частотная характеристика, при этом $\psi(\omega) = \arg W(j\omega)$, что является фазово-частотной характеристикой системы.

Как известно, для каждого фиксированного значения $\omega = \omega_i$ динамическая передаточная функция на плоскости (U, jV) может быть изображена вектором $A(\omega_i)$, отклоненным от положительного направления оси абсцисс на угол $\psi(\omega_i)$.

Оценивание абсолютной устойчивости, в нашем случае самоорганизованности, агрегата с одной нелинейностью удобно выполнять, используя метод В. М. Попова [7].

Когда уравнение $Y(s)=0$ имеет все корни с отрицательными вещественными частями, можно утверждать, что линейная часть системы устойчива. Тогда критерий устойчивости В. М. Попова формулируется следующим образом.

Движение системы с устойчивой линейной частью абсолютно устойчиво, если можно подобрать такое конечное вещественное число q , чтобы при всех $\omega > 0$ соблюдалось неравенство

$$U(\omega) - qV(\omega) + 1/\aleph' > 0,$$

где \aleph' – вещественное число;

$U(\omega)$ и $V(\omega)$ – вещественная и мнимая частотные характеристики линейной части системы, при этом

$$W(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega).$$

Другими словами, движение системы абсолютно устойчиво в том случае, если через точку $(-1/\aleph', 0)$ плоскости $W^*(j\omega)$ удастся провести прямую с таким угловым коэффициентом q , чтобы годограф $W^*(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega)$ лежал справа от этой прямой.

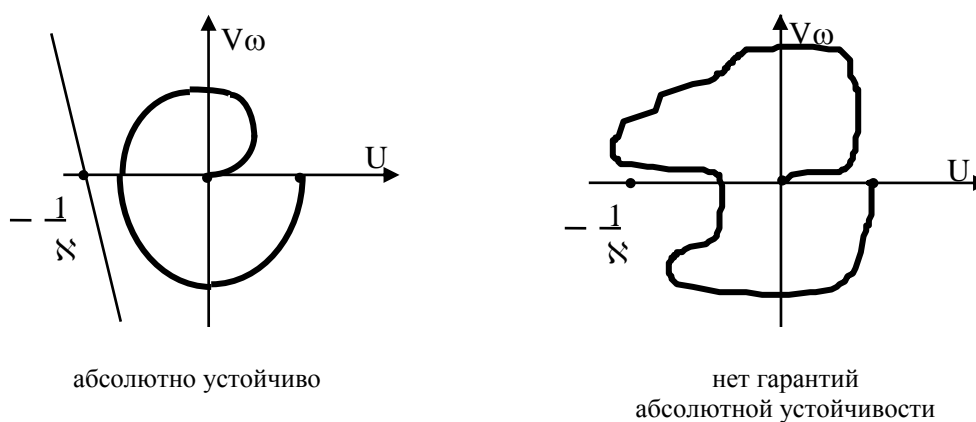


Рис. 1. Варианты движения системы

Таким образом, положения теории управления дают возможность оценивания самоорганизованности (кинематических гидравлических и др.) агрегатов или систем КРК еще на стадии внешнего проектирования при обосновании потенциального облика агрегатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, для механических объектов КРК, на основании изложенных в статье свойств и их показателей, может быть составлена таблица (табл. 1), позволяющая ввести интегральный показатель качества.

Таблица 1

Сводная таблица оценочных свойств

Свойство	Оценочная функция	Шкала измерений
Целевая эффективность	$E_f = E_f(q, A, t)$	0–1
Структурное совершенство	$\min N(G)$ $\min deg_{(G)} V$	Простое число (2, ..., 4)
Устойчивость	$\sigma_{эф} < [\sigma_m]$ $T_{раб} \ll T_{пл}$	От «да» до «нет»
Управляемость	$\min A_{упр}$ $W = W[q, A, A_{упр}, t]$	0–1
Самоорганизованность	$W(j\omega) = U(\omega) + j\omega V(\omega)$	От «да» до «нет»

Как видно из анализа таблицы, для всех возможных вариантов реализации существуют технические решения, для которых четыре последних показателя могут достигать своих оптимальных значений. Поэтому окончательное решение о предпочтении может приниматься при следующем условии:

$$x_j^{opt} = E_f(E_{fnэ}) \Rightarrow \max, \quad x_j = x_j^{opt}, \quad j = 2, 3, 4, 5,$$

что фактически сводит задачу к поиску решений с максимальным показателем целевой эффективности.

Вывод. Изложенная в статье концепция позволяет использовать предложенный подход как к отдельным механическим объектам КРК, так и к их совокупности, в этом случае качество группы объектов, объединенных какой-либо общей целью, оценивается как сумма качеств каждого из них.

Список используемых источников

1. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М. : Наука. Гл. редакция физико-матем. литературы, 1984. – 586 с.
2. Надежность и эффективность в технике : справочник : в 10 т. / под ред. В. Ф. Уткина. – М. : Машиностроение, 1988. – Т. 3. – 342 с.
3. Агрегирование показателей свойств сложных технических систем на основе информационной свертки / А. В. Лагун [и др.] // Информация и Космос / под общ. ред. С. П. Присяжнюка. – СПб. : изд-во «Art-Xpress», 2018. – Т. 3. – С. 44–48.
4. Лагун А. В., Козлов В. В., Казахов Б. Д. Обоснование показателей для оценки результативности функционирования системы защиты ракетно-космического комплекса в условиях внешнего деструктивного воздействия // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2020. – Вып. 675. – С. 36–44.
5. Лагун А. В., Козлов В. В., Казахов Б. Д. Методика оценивания уровня влияния внешнего деструктивного фактора на безопасность эксплуатации сложного группового объекта // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2021. – Вып. 678. – С. 250–262.
6. Основы проектирования ракетно-космических комплексов / Г. П. Бирюков [и др.]. – СПб. : ООО «Алфавит», 2002. – 395 с.
7. Оре О. Теория графов. – 2-е изд. – М. : Наука. Гл. редакция физико-математ. литературы, 1980. – 336 с.

В. И. Крыжановский,
кандидат технических наук, доцент;
С. В. Слатов;
И. А. Трофимов,
кандидат технических наук, доцент

АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ДЛЯ ПЕРЕВОДА УПРАВЛЯЕМОГО ОБЪЕКТА В ЗАДАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗА КОНЕЧНОЕ ЧИСЛО ПЕРИОДОВ ДИСКРЕТНОСТИ

Проведена модификация алгоритма формирования последовательности управляющих импульсов при дискретном управлении с амплитудно-импульсной модуляцией для перевода объекта управления из произвольного начального состояния в конечное состояние за заданное число периодов дискретности. Задача в исходной постановке приводится к решению задачи линейного программирования. Разработанный модифицированный алгоритм отличается от известных существенным уменьшением размерности задачи линейного программирования для снижения затрат на вычислительные процессы.

Ключевые слова: дискретное управление, конечное число шагов, задача линейного программирования.

ВВЕДЕНИЕ

Известно [1], что при дискретном управлении возможен перевод линейного управляемого объекта из произвольного начального состояния в заданное состояние за конечное число периодов дискретности. В общем случае минимальное число шагов для такого перевода равно порядку дифференциального уравнения n , которым описывается динамика движения управляемого объекта. Вопросы разработки алгоритмов для формирования управления как по разомкнутой, так и по замкнутой схеме достаточно подробно изложены в работе [2]. Однако перевод за минимальное число шагов возможен в общем случае при отсутствии ограничений на управляющее воздействие. При наличии ограничений применение таких алгоритмов ведет к снижению запаса устойчивости, вплоть до его потери. Влияние ограничения на управление можно ослабить или устранить путем увеличения периода дискретности, но при этом в общем случае существенно снижается быстродействие. В работах [3, 4] изложены алгоритмы формирования управления с учетом ограничений на управляющие воздействия, которые обеспечивают перевод объекта за заданное число периодов дискретности $N \geq n$, при этом исходная задача сводится к решению задачи линейного программирования. Однако известные алгоритмы рассмотрены для частного случая, когда знаменатель дискретной передаточной функции содержит хотя бы один единичный корень. Кроме того, для решения задачи требуется определять $5N$ переменных. Настоящая работа направлена на дальнейшее развитие этих алгоритмов с целью решения задачи для любого набора корней в знаменателе дискретной передаточной функции, уменьшения размерности задачи линейного программирования, нахождения упрощенных соотношений для систем второго и третьего порядков с целью уменьшения затрат на вычислительные процессы.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Заданы передаточная функция $W(z)$ при дискретном управлении с амплитудно-импульсной модуляцией

$$W(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{b_1 z^{n-1} + b_2 z^{n-2} + \dots + b_n}{z^n + a_1 z^{n-1} + \dots + a_n} \quad (1)$$

и соответствующее ей разностное уравнение

$$\begin{aligned} y(i+n) + a_1 y(i+n-1) + \dots + a_n y(i) = \\ = b_1 u(i+n-1) + b_2 u(i+n-2) + \dots + b_n u(i). \end{aligned} \quad (2)$$

В формулах (1) и (2) введены следующие обозначения:

n – порядок управляемого объекта;

T – период дискретности;

$a_i, b_i, i = 1, 2, \dots, n$ – известные постоянные коэффициенты;

$y(i)$ – значение управляемой величины в момент времени $t = iT, i = 0, 1, \dots$;

$u(i)$ – значение управляющего прямоугольного импульса, передний фронт которого формируется в момент времени $t = iT, i = 0, 1, \dots$

Заданы начальные условия: $y(0), y(-1), y(-n+1), u(-1), u(-2), \dots, u(-n+1)$.

Необходимо сформировать алгоритм для определения последовательности управляющих воздействий $u(0), u(1), \dots, u(N-1)$, на которые наложены ограничения $u(i) \leq U_m$ для $i = 0, 1, \dots$ и подача которых на вход управляемого объекта обеспечит выполнение условий:

$$y(N) = y(N+1) = \dots = g_0, \quad u(N) = u(N+1) = \dots = U_0, \quad (3)$$

а также минимизирует целевую функцию

$$J = \sum_{i=0}^{N-1} |u(i)|. \quad (4)$$

АЛГОРИТМ ДЛЯ СИСТЕМЫ ВТОРОГО ПОРЯДКА

Разностное уравнение объекта управления для системы второго порядка имеет вид

$$y(i) = -a_1 y(i-1) - a_2 y(i-2) + b_1 u(i-1) + b_2 u(i-2). \quad (5)$$

Для решения поставленной задачи составим систему уравнений, описывающую процесс перевода управляемого объекта с учетом условий (3)

$$\begin{aligned} y(1) &= -a_1 y(0) - a_2 y(-1) + b_1 u(0) + b_2 u(-1), \\ y(2) &= -a_1 y(1) - a_2 y(0) + b_1 u(1) + b_2 u(0), \\ &\dots \\ y(N) &= -a_1 y(N-1) - a_2 y(N-2) + b_1 u(N-1) + b_2 u(N-2), \\ y(N+1) &= -a_1 y(N) - a_2 y(N-1) + b_1 u(N) + b_2 u(N-1), \\ y(N+2) &= -a_1 y(N+1) - a_2 y(N) + b_1 u(N+1) + b_2 u(N). \end{aligned} \quad (6)$$

Последнее уравнение системы (6) с учетом условий (3) принимает вид

$$(1 + a_1 + a_2) g_0 = (b_1 + b_2) U_0, \quad (7)$$

отсюда находим

$$U_0 = \frac{(1 + a_1 + a_2)g_0}{b_1 + b_2}. \quad (8)$$

Вводим векторы:

$$\begin{aligned} \bar{x}^T &= [x_1, x_2, \dots, x_{N-1}], \\ x_1 &= y(1), x_2 = y(2), \dots, x_{N-1} = y(N-1), \\ \bar{u}^T &= [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_N], \\ u_1 &= u(0), u_2 = u(1), \dots, u_N = u(N-1). \end{aligned} \quad (9)$$

С учетом введенных векторов записываем первые $N-1$ уравнений системы (6) в векторно-матричной форме:

$$\mathbf{A}\bar{x} + \mathbf{B}\bar{u} = \bar{p}, \quad (10)$$

где

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ a_1 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ a_2 & a_1 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & a_2 & a_1 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -b_1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -b_2 & -b_1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -b_2 & -b_1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -b_2 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -b_2 & -b_1 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Элементы вектора \bar{p} вычисляются по соотношениям:

$$\begin{aligned} p_1 &= -a_1 y(0) - a_2 y(-1) + b_2 u(-1), \\ p_2 &= -a_2 y(0), \\ p_i &= 0, i = 3, \dots, N-1. \end{aligned} \quad (13)$$

Уравнения для $y(N)$ и $y(N+1)$ в векторно-матричной форме выглядят следующим образом:

$$\mathbf{D}\bar{x} + \mathbf{G}\bar{u} = \bar{q}, \quad (14)$$

где

$$\begin{aligned} \mathbf{D} &= \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & a_2 & a_1 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & a_2 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{G} &= \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & -b_2 & -b_1 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & -b_2 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (15)$$

элементы вектора \bar{q} вычисляются по соотношениям:

$$\begin{aligned} q_1 &= -g_0, \\ q_2 &= -g_0 - a_1 g_0 + b_1 U_0. \end{aligned} \quad (16)$$

Находим вектор \bar{x} из уравнения (10):

$$\bar{x} = \mathbf{A}^{-1}(\bar{p} - \mathbf{B}\bar{u}). \quad (17)$$

Подставляем значение \bar{x} в уравнение (14) и получаем выражение

$$\mathbf{H}\bar{u} = \bar{c}, \quad (18)$$

где

$$\begin{aligned} \mathbf{H} &= \mathbf{G} - \mathbf{D}\mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}, \\ \bar{c} &= \bar{q} - \mathbf{D}\mathbf{A}^{-1}\bar{p}. \end{aligned} \quad (19)$$

Выражение (18) связывает требуемый вектор управления \bar{u} с начальными и конечными условиями движения управляемого объекта, а также его параметрами. Поскольку матрица \mathbf{H} имеет размерность $n \times N$, существует бесчисленное множество векторов \bar{u} , являющихся решением уравнения (18). Путем решения задачи линейного программирования из данного множества будем находить вектор \bar{u} , обеспечивающий минимум целевой функции (4). Для этого необходимо преобразовать соотношение (18) таким образом, чтобы обеспечить неотрицательность переменных, а также заменить нелинейную целевую функцию (4) эквивалентной линейной. С этой целью представим компоненты вектора \bar{u} следующим образом:

$$u(i) = z_{i+1} - U_m, i = 0, 1, \dots, N-1. \quad (20)$$

С учетом соотношений (20) уравнение (18) приводится к виду

$$\mathbf{H}\bar{z} = \bar{c} + \mathbf{H}\bar{e}U_m, \quad (21)$$

где \bar{e} – единичный вектор размерности N ,

$$\bar{z}^T = [z_1 \ z_2 \ \dots \ z_N]$$

Элементы вектора \bar{a} свободных членов соотношения (21)

$$\bar{a} = \bar{c} + \mathbf{H}\bar{e}U_m$$

могут получиться отрицательными, что не соответствует условиям задачи линейного программирования, поэтому преобразуем выражение (18) к виду

$$\mathbf{F}\bar{z} = \bar{m}, \quad (22)$$

где \mathbf{F} – матрица размерности $n \times N$, элементы которой вычисляются по соотношению $f_{ij} = h_{ij} \text{sign}(a_i)$;

h_{ij} – соответствующий элемент матрицы \mathbf{H} ;

a_i – соответствующий элемент вектора \bar{a} , $m_i = a_i \text{sign}(a_i)$.

Иными словами, знак элементов матрицы \mathbf{H} и элементов вектора \bar{a} меняем на противоположный, если $a_i < 0$. Уравнение (22) эквивалентно уравнению (21) и соответствует стандартным условиям задачи линейного программирования.

С учетом выражения (20) ограничения на управляющие импульсы и целевую функцию (4) запишем следующим образом:

$$\begin{aligned} z_i &\leq 2U_m, i = 1, 2, \dots, N, \\ J &= \sum_{i=1}^N |z_i - U_m| \rightarrow \min. \end{aligned} \quad (23)$$

Вводим дополнительные переменные:

$$-z_{N+i} \leq z_i - U_m \leq z_{N+i}, i = 1, 2, \dots, N, \quad (24)$$

В работе [3] показано, что целевая функция

$$J = \sum_{i=1}^N z_{N+i} \rightarrow \min \quad (25)$$

эквивалентна целевой функции (23), следовательно, и целевой функции (4).

Таким образом, задача линейного программирования состоит из системы уравнений (22), ограничений (24), которые можно после преобразований записать в виде

$$\begin{aligned} z_i + z_{N+i} &\geq U_m, \\ z_i - z_{N+i} &\leq U, \\ i &= 1, 2, \dots, N, \end{aligned} \quad (26)$$

ограничений (23)

$$z_i \leq 2U_m, i = 1, 2, \dots, N$$

и целевой функции (25).

Вышеприведенный алгоритм содержит операцию обращения матрицы \mathbf{A} . Эта операция при больших размерностях матрицы \mathbf{A} требует стандартными методами достаточно большого объема вычислительных затрат. Проведенные расчеты показали, что в силу специфики структуры матрицы \mathbf{A} обратная матрица имеет вид

$$\mathbf{A}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ b_{21} & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ b_{31} & b_{21} & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{N-21} & b_{N-31} & b_{N-41} & \dots & 1 & 0 \\ b_{N-11} & b_{N-21} & b_{N-31} & \dots & b_{21} & 1 \end{bmatrix}, \quad (27)$$

а элементы первого столбца должны вычисляться по соотношениям:

$$\begin{aligned} b_{11} &= 1, \\ b_{21} &= -a_1, \\ b_{k1} &= -a_1 b_{k-11} - a_2 b_{k-21}, \\ k &= 3, 4, \dots, N-1. \end{aligned} \quad (28)$$

Таким образом, для вычисления всех элементов обратной матрицы необходимо по конечным соотношениям (28) вычислить элементы только первого столбца, что существенно экономит вычислительные ресурсы и повышает быстродействие вышеприведенного алгоритма расчета.

Пример 1.

Применение алгоритма рассмотрим для системы, предназначенной для углового разворота платформы с целью наведения оптико-электронного прибора, рассмотренной в работе [5]. Разворот платформы производится с помощью электрического двигателя через редуктор. Как объекты управления двигатель и редуктор с присоединенной платформой представляют собой инерционное интегрирующее звено, передаточная функция которого имеет вид

$$W(p) = \frac{k}{p(T_M p + 1)}. \quad (29)$$

В работе [5] определены параметры для решения задачи:

коэффициент передачи двигателя $300^\circ / (\text{В} \cdot \text{с})$;
 коэффициент передачи редуктора $0,01$;
 постоянная времени подвижной части системы с присоединенной нагрузкой $T_M = 0,27 \text{ с}$;
 номинальное напряжение на входе выбранного двигателя $U_H = 60 \text{ В}$;
 начальные условия нулевые, требуемый угол разворота 100° .

Для передаточной функции (29) при непрерывном управлении может быть получена дискретная передаточная функция

$$W(z) = \frac{b_1 z + b_2}{z^2 + a_1 z + a_2}, \quad (30)$$

где коэффициенты определяются выражениями:

$$b_1 = k [T - T_M (1 - d)], d = e^{-\frac{T}{T_M}},$$

$$b_2 = k [-Td + T_M (1 - d)],$$

$$a_1 = -1 - d,$$

$$a_2 = d.$$

После подстановки численных значений находим:

$$b_1 = 0,176, b_2 = 0,137,$$

$$a_1 = -1,476, a_2 = 0,476.$$

Решение задачи производилось с помощью программы, написанной на языке FOXPRO, в которой для решения задачи линейного программирования использовалась электронная таблица *Excel* с надстройкой «Поиск решения».

Таблица *Excel* с найденным решением для $N = 5$ представлена на рис. 1, форма с параметрами решения – на рис. 2. Исходные данные таблицы *Excel* и параметры решения формировались автоматически программой FOXPRO.

На рис. 3 показаны переходные процессы, где 1 – оптимальный по быстродействию процесс, 2 – процесс при линейном алгоритме управления, 3, 4, 5 – процессы конечной длительности для $N = 5, 6, 7$ соответственно. Следует отметить, что данные для процессов 1 и 2 были получены в работе [5].

В табл. 1 приведены данные по сформированному управляющему напряжению на входе двигателя и по длительности переходного процесса, а также значения функционала J соотношения 4.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
2													
3	Коэффициенты целевой функции	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1		
4													
5	Изменяемые переменные	120	120	120	78.93345	27.73322	60	60	60	18.93345	32.26678		
6													
7	Ограничения	0.578103	0.554071	0.503665	0.397937	0.176176	0	0	0	0	0	232.5971	232.5971
8		0.264159	0.240127	0.189721	0.083994	-0.13777	0	0	0	0	0	86.0901	86.0901
9		1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	180	60
10		0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	180	60
11		0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	180	60
12		0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	97.8669	60
13		0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	60	60
14		1	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	60	60
15		0	1	0	0	0	0	-1	0	0	0	60	60
16		0	0	1	0	0	0	0	-1	0	0	60	60
17		0	0	0	1	0	0	0	0	-1	0	60	60
18		0	0	0	0	1	0	0	0	0	-1	-4.53357	60
19		1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	120	120
20		0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	120	120
21		0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	120	120
22		0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	78.93345	120
23		0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	27.73322	120

Рис. 1. Таблица *Excel* с найденным решением

Функционал J характеризует энергопотребление, расходуемое на разворот. Как видно из таблицы, для управления по линейному алгоритму требуется наибольший расход. Длительность переходного процесса при $N=5$ всего на 9,9% превышает длительность переходного процесса при оптимальном по быстрдействию развороте, однако энергопотребление при этом уменьшается на 19,5%, что свидетельствует об эффективности управления, сформированного с помощью разработанного алгоритма.

АЛГОРИТМ ДЛЯ СИСТЕМЫ ТРЕТЬЕГО ПОРЯДКА

Дискретная передаточная функция для системы третьего порядка и соответствующее ей разностное уравнение имеют вид:

$$W(z) = \frac{b_1 z^2 + b_2 z + b_3}{z^3 + a_1 z^2 + a_2 z + a_3}, \quad (31)$$

$$y(i) = -a_1 y(i-1) - a_2 y(i-2) - a_3 y(i-3) + b_1 u(i-1) + b_2 u(i-2) + b_3 u(i-3). \quad (32)$$

Алгоритм формирования управляющих воздействий для системы третьего порядка ничем не отличается от алгоритма для второго порядка, меняются только вид и размерность исходных матриц, векторов и переменных. Из системы уравнений, составленной с использованием разностного уравнения (32), по аналогии с системой уравнений (6) определяем:

$$y(i) = -a_1 y(i-1) - a_2 y(i-2) - a_3 y(i-3) + b_1 u(i-1) + b_2 u(i-2) + b_3 u(i-3),$$

$$U_0 = \frac{(1 + a_1 + a_2 + a_3) g_0}{b_1 + b_2 + b_3}.$$

Матрицы \mathbf{A} , \mathbf{B} и вектор \bar{p} выражения (10) имеют вид:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ a_1 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ a_2 & a_1 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ a_3 & a_2 & a_1 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (33)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -b_1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -b_2 & -b_1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -b_3 & -b_2 & -b_1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -b_3 & -b_2 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -b_2 & -b_1 \end{bmatrix}. \quad (34)$$

$$p_1 = -a_1 y(0) - a_2 y(-1) - a_3 y(-2) + b_2 u(-1) + b_3 u(-2),$$

$$p_2 = -a_2 y(0) - a_3 y(-1) + b_3 u(-1), \quad (35)$$

$$p_i = 0, i = 4, \dots, N-1.$$

Матрицы \mathbf{D} , \mathbf{G} и вектор \bar{q} выражения (14) имеют вид:

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & \dots & a_3 & a_2 & a_1 \\ 0 & \dots & 0 & a_3 & a_2 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & a_3 \end{bmatrix}, \quad (36)$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 & \dots & -b_3 & -b_2 & -b_1 \\ 0 & \dots & 0 & -b_3 & -b_2 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & -b_3 \end{bmatrix}, \quad (37)$$

$$\begin{aligned} q_1 &= -g_0, \\ q_2 &= -g_0 - a_1 g_0 + b_1 U_0, \\ q_3 &= -g_0 - a_1 g_0 - a_2 g_0 + b_2 U_0 + b_1 U_0. \end{aligned} \quad (38)$$

Обратная матрица \mathbf{A}^{-1} имеет вид (27), а элементы первого столбца должны вычисляться по выражениям:

$$\begin{aligned} b_{11} &= 1, b_{21} = -a_{21}, b_{31} = a_1^2 - a_2, \\ b_{k1} &= -a_1 b_{k-11} - a_2 b_{k-21} - a_3 b_{k-31}, \\ k &= 4, 5, \dots \end{aligned} \quad (39)$$

Пример 2.

Используем вышеприведенный алгоритм для системы, рассмотренной в примере 1, при условии учета не только механической постоянной времени T_M , но и электрической постоянной времени T_Y электродвигателя, влиянием которой обычно пренебрегают, поскольку она, как правило, на порядок меньше, чем T_M . Однако опыт эксплуатации показал, что при быстрых разворотах влияние T_Y на динамику движения становится существенным и его следует учитывать. В этом случае $n=3$, передаточная функция электродвигателя при непрерывном управлении имеет вид

$$W(p) = \frac{k}{p(T_M p + 1)(T_Y p + 1)},$$

а дискретная передаточная функция описывается формулой (31), коэффициенты которой находятся по соотношениям:

$$\begin{aligned} a_1 &= -1 - d_1 - d_2, \\ a_2 &= d_1 + d_2 + d_1 d_2, \\ a_3 &= -d_1 d_2, \\ b_1 &= kT(d_1 + d_2) + B(1 - d_1) + C(1 - d_2), \\ b_2 &= -kT(d_1 + d_2) - B(1 - d_1)(1 + d_2) - C(1 - d_2)(1 + d_1), \\ b_3 &= kT d_1 d_2 + B(1 - d_1) d_2 + C(1 - d_2) d_1, \end{aligned} \quad (40)$$

где

$$\begin{aligned} d_1 &= e^{-\frac{T}{T_M}}, d_2 = e^{-\frac{T}{T_Y}}, \\ B &= -\frac{kT_M^2}{T_M - T_Y}, C = \frac{kT_Y^2}{T_M - T_Y}. \end{aligned} \quad (41)$$

Выбираем $T_d = 0,05$ с, остальные параметры подвижной части системы выбираем такими же, как в примере 1. После подстановки численных значений находим:

$$b_1 = 0,113, \quad b_2 = 0,183, \quad b_3 = 0,012,$$

$$a_1 = -1,495, \quad a_2 = 0,504, \quad a_3 = -0,009.$$

Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры процессов для системы третьего порядка

Процесс	Время, с	$u(0)$, В	$u(1)$, В	$u(2)$, В	$u(3)$, В	$u(4)$, В	$u(5)$, В	$u(6)$, В	J
$N=5$	1,0	60,0	60,0	60,0	24,3	-39,6	0	0	243
$N=6$	1,2	60,0	60,0	60,0	20,23	-34,1	0,6	0	235
$N=7$	1,4	60,0	60,0	57,7	0	0	-11,2	0,2	189
Оптимальный по быстродействию	0,99	-	-	-	-	-	-	-	297
Линейное управление	3,38	-	-	-	-	-	-	-	352

Как видно из таблицы, влияние электрической постоянной времени приводит к увеличению длительности переходных процессов как при линейном управлении, так и при оптимальном по быстродействию развороте. Длительность переходных процессов конечной длительности не изменяется, однако энергопотребление при этом возрастает на 5–20% в зависимости от числа шагов. На рис. 4 и 5 представлены переходные процессы и соответствующее управление для $N = 6$. Сплошными линиями показаны процессы без учета электрической постоянной времени, а пунктирными – с ее учетом.

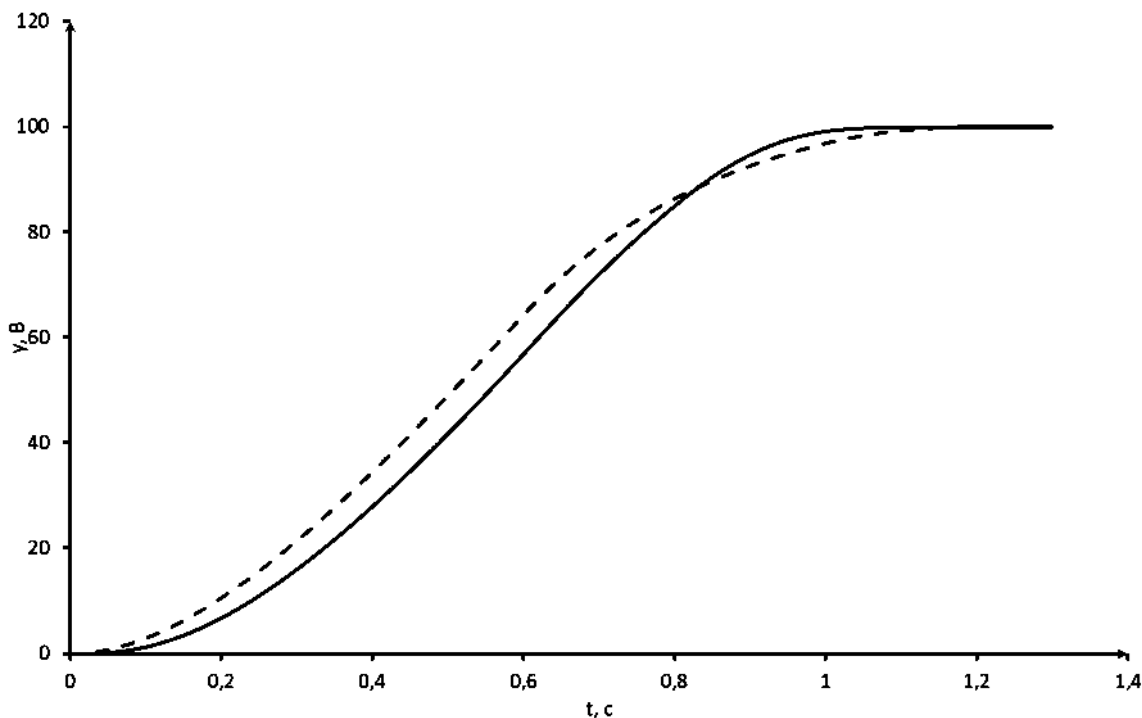


Рис. 4. Переходные процессы для систем второго и третьего порядка

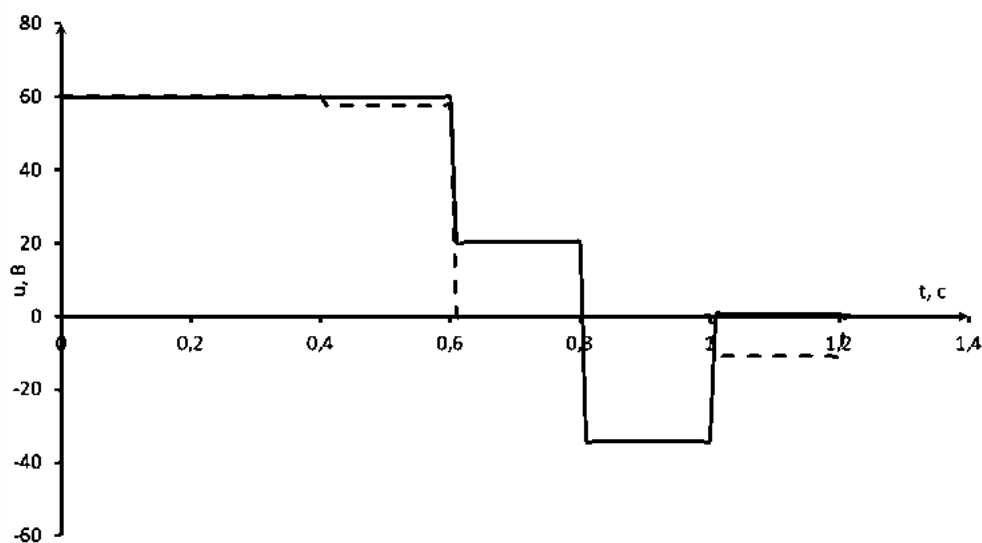


Рис. 5. Управление для систем второго и третьего порядка

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведена модификация известного алгоритма, с помощью которого решается задача перевода управляемого объекта из произвольного состояния в заданное состояние за конечное число периодов дискретности. Модифицированный алгоритм обеспечивает решение задачи для более широкого класса объектов управления, требует меньшего объема вычислительных ресурсов за счет уменьшения количества искомых переменных с $5N$ до $2N$ при решении задачи линейного программирования и использования полученных конечных соотношений для вычисления обратной матрицы.

В работе основное внимание было сосредоточено на детальной разработке алгоритма для объектов второго и третьего порядка, однако нет принципиальных трудностей для получения необходимых выражений и для объектов более высокого порядка.

Список используемых источников

1. Лучко С. В. Теория автоматического управления : учебник. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2007. – 478 с.
2. Барковский В. В., Захаров В. Н., Шаталов А. С. Методы синтеза систем управления. – М. : Машиностроение, 1981. – 327 с.
3. Табак Д., Куо Б. Оптимальное управление и математическое программирование. – М. : Наука, 1975. – 279 с.
4. Лучко С. В. Крыжановский В. И. Оптимальное по расходу ресурса управление динамическим объектом // Известия вузов. Приборостроение. – 1981. – № 6. – С. 31–36.
5. Крыжановский В. И., Трофимов И. А., Слатов С. В. Оптимальное по быстродействию управление в двухконтурной следящей системе наведения оптико-электронного прибора // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2021. – Вып. 678. – С. 299–309.

Р. А. Мосягин,
кандидат политических наук;
Ю. Е. Тупицин,
кандидат технических наук, доцент;
Е. В. Шишкин,
кандидат технических наук, доцент

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ВЫБОРА АЛЬТЕРНАТИВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В НЕШТАТНЫХ СИТУАЦИЯХ

Рассмотрена постановка задачи многокритериального выбора варианта выполнения восстановительных работ из множества возможных. Критерии выбора задаются в виде совокупности целей выполнения работ.

Выбор осуществляет группа экспертов, поэтому первоначально решается задача индивидуального, а затем группового выбора. Рассматриваются алгоритмы выбора оптимального варианта на основе принципа Парето, свертки функций предпочтения, метода суммы рангов, нечеткого интеграла, спектрального метода.

Ключевые слова: многокритериальный выбор, множество целей и альтернатив, принцип Парето, свертка функций предпочтения, метод суммы рангов, нечеткий интеграл, спектральный метод.

ВВЕДЕНИЕ

Задача многокритериального выбора альтернатив восстановления работоспособности технических систем (ТС) в нештатной ситуации (а при наличии нескольких матриц, заполненных различными экспертами, – группового многокритериального выбора) заключается в следующем [1]. Пусть для достижения конечного набора целей имеется несколько альтернативных вариантов восстановления, причем каждый из них можно оценивать по степени достижения каждой из целей по какой-либо шкале (по шкале отношений, баллов, интервалов, координатной шкале).

Результат показывает матрица «цели – средства», каждый столбец которой выражает предпочтительность одной из альтернатив с точки зрения достижения конкретной цели. Задача заключается в упорядочении альтернатив для «достижения всех целей».

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ВЫБОРА ВАРИАНТА РЕШЕНИЯ

Формально задачу многокритериального выбора варианта решения Y^* можно записать в виде

$$\langle Y, D, S, A, Y^* \rangle, \quad (1)$$

т. е. данная задача описывается с помощью четырех множеств: D – экспертов; S – ситуаций; A – целей и Y – множества вариантов решения. Эти множества полностью описывают ситуацию и пути ее разрешения [2, 3].

Множество D конечно. В зависимости от его мощности задачу можно отнести к задачам индивидуального или группового выбора. Для задач управления эксплуатацией ТС наиболее характерны задачи принятия решения в нештатной ситуации. При этом, если все исполнители выполняют свои функциональные обязанности согласно предназначению, то принятием решения конкретной задачи, как правило, занимается один человек, наделенный соответствующими полномочиями. Следовательно, подавляющая часть задач, решаемых в нештат-

ной ситуации, является задачами индивидуального выбора лицом, принимающим решение (ЛПР).

Множество S также конечно и является объединением множеств S_i , сформированных каждым экспертом:

$$S = \bigcup_i S_i, \quad (2)$$

где $i = \{1, |D|\}$.

Множество целей $A > 1$. При одном элементе многокритериальная задача теряет смысл. Так как в каждой ситуации каждый эксперт определяет свою систему целей, то множество A можно представить как двойное объединение:

$$A = \bigcup_i \bigcup_j A_{ij}, \quad (3)$$

где $i = \{1, |D|\}$, $j = \{1, |S|\}$.

Множество вариантов Y составляется из подмножеств, сгенерированных каждым экспертом, и может быть представлено в виде

$$Y = \bigcup_i \bigcup_j Y_{ij}. \quad (4)$$

Чтобы задача имела смысл, множество Y должно состоять не менее чем из двух элементов.

Для задачи многокритериального коллективного выбора существенным показателем является коэффициент важности эксперта x_i^d . Для всех экспертов должно соблюдаться условие

$$\sum_i x_i^d = 1. \quad (5)$$

Принятые в формулах обозначения $|D|$ и $|S|$ – это мощности множеств D и S .

В процессе решения задачи многокритериального выбора варианта восстановления целесообразно различать отдельные этапы, которые с достаточной степенью общности относятся к процессам, осуществляемым разноуровневыми и разнотипными исполнителями. В связи с этим процесс решения рассматриваемой задачи включает следующие этапы (рис. 1):

- формулирование генеральной цели решения задачи;
- анализ (классификацию) нештатной ситуации;
- формирование множества альтернативных вариантов восстановления работоспособности и критериев для их оценки;
- выбор метода оценивания в зависимости от предпочтения ЛПР;
- непосредственная оценка вариантов в соответствии с системой критериев и предпочтения ЛПР;
- расчет интегральной оценки и выбор варианта решения.

Следует отметить три важных момента. Во-первых, любой из выделенных этапов в случае необходимости может подразделяться на более детальные операции или действия. Во-вторых, каждый из них реализуется с использованием своих специфических методов, способов или процедур, в различной степени поддающихся формализации, а в большинстве случаев эвристических, нестандартных, творческих. В-третьих, для такой организационно-технической системы, как система обеспечения условий воздушной среды в помещениях оружия в настоящее время не существует методов, позволяющих автоматизировать все этапы решения задачи. Это связано с практической трудностью осуществления таких этапов, как формулирование генеральной цели и непосредственной оценки альтернатив. Их особенность состоит в том, что база знаний интеллектуальной системы не может содержать абсолютно полную информацию о целях действий ТС, а механизм вывода не имеет интуитивных способностей, присущих человеческому разуму. В отношении оценки альтернатив база зна-

ний может содержать ориентировочные значения предпочтительности применения вариантов в сложившейся ситуации. Окончательная оценка определяется человеком.

Таким образом, модель многокритериального выбора варианта восстановления работоспособности ТС включает следующие модели [4]:

- модель классификации нештатной ситуации;
- модель формирования вариантов целей (критериев);
- модель формирования альтернативных вариантов решений;
- модель выбора метода оценивания альтернатив;
- модель оценки альтернатив.

Задача классификации ситуации, как и в предыдущей задаче, может быть сформулирована следующим образом.

Известно множество классов ситуаций $S_0 = \{S_1, S_2, S_i, S_n\}$, где S_i – класс ситуации. Каждый из классов характеризуется вектором признаков

$$X_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{im}\}, \quad (6)$$

где x_{ij} – признак класса ситуаций (количество поврежденных элементов, характер разрушений элементов систем, параметры состояния внешней и внутренней среды и др.).



Рис. 1. Задача многокритериального выбора варианта решения задачи

В результате оценивания обстановки получен вектор признаков текущей ситуации:

$$Y = \{y_1, y_2, \dots, y_j, \dots, y_m\}, \quad (7)$$

где y_j – признак ситуации.

Решение задачи $S^* = C(S_0)$ заключается в оценке вектора признаков текущей ситуации S_i , определении, к какому классу S^* относится текущая ситуация. Интерпретация S^* может быть различной и связана с типом решаемой задачи.

Особенность данной задачи позволяет использовать ее детерминированную постановку, т. е. использовать логические методы классификации. При этом вектор признаков класса ситуации формируется в виде

$$x_y = \begin{cases} 1, & \text{если } j\text{-е условие выполняется для } i\text{-й ситуации;} \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (8)$$

Тогда ситуация, характеризующаяся вектором признаков (7), может быть отнесена к i -му классу только в том случае, если все значения условий принадлежности ситуации к i -му классу для текущей ситуации и ситуации i -го класса совпадают [5].

Задача формирования вариантов целей (критериев) в общем виде может быть сформулирована как выбор подмножества критериев G^* , соответствующих решаемой задаче Zd^* в текущей ситуации S^* , из общего множества критериев G_0 в соответствии с функцией выбора C_1 :

$$G^* = C_1(G_0, Zd^*, S^*). \quad (9)$$

Задача 1. При реализации функций управления эксплуатацией ТС решается комплекс задач $Zd_0 = \{Zd_1, Zd_2, \dots, Zd_k\}$ в различных условиях обстановки, описываемых множеством классов ситуаций $S_0 = \{S_1, S_2, \dots, S_i, \dots, S_n\}$. Имеется множество целей (критериев), которые применяются для оценки вариантов решений: $G_0 = \{G_1, G_2, \dots, G_j, \dots, G_m\}$; k , n и m – количество задач в комплексе, классов нештатных ситуаций и критериев соответственно.

Необходимо установить соответствие между парой l -я задача в i -й ситуации и вектором критериев $\{ \langle G_1, w_1 \rangle, \langle G_2, w_2 \rangle, \dots, \langle G_j, w_j \rangle, \dots, \langle G_p, w_p \rangle, \}$, учитываемых при выборе альтернатив. Каждому критерию ставится в соответствие его вес w_j в данном подмножестве. При этом

$$\sum_j w_j = 1, \quad j=1, \dots, P,$$

где P – мощность подмножества критериев для данной задачи управления.

Тогда вектор критериев для оценки альтернатив формируется в виде

$$G^* = \begin{cases} G_j \in G^*, & \text{если } w_j > 0, \\ G_j \notin G^*, & \text{если } w_j = 0. \end{cases} \quad j = 1, \dots, P. \quad (10)$$

Аналогично формулируется задача формирования вектора альтернативных вариантов решений. Необходимо осуществить выбор подмножества вариантов Y^* , соответствующих решаемой задаче Zd^* в текущей ситуации S^* , из общего множества вариантов Y_0 в соответствии с функцией выбора C_2 :

$$Y^* = C_2(Y_0, Zd^*, S^*). \quad (11)$$

Задача 2. При реализации функций управления эксплуатацией ТС решается комплекс задач $Zd_0 = \{Zd_1, Zd_2, \dots, Zd_k\}$ в различных условиях обстановки, описываемых множеством классов ситуаций $S_0 = \{S_1, S_2, \dots, S_i, \dots, S_n\}$. Имеется множество вариантов решений, которые могут быть реализованы силами и средствами эксплуатационного персонала: $Y_0 = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_j, \dots, Y_m\}$.

Необходимо установить соответствие между парой l -я задача в i -й ситуации и вектором альтернативных вариантов решений $\{ \langle Y_1, q_1 \rangle, \langle Y_2, q_2 \rangle, \dots, \langle Y_j, q_j \rangle, \dots, \langle Y_R, q_R \rangle, \}$, которые соответствуют задаче и могут быть реализованы в данной ситуации. Каждому варианту ставится в соответствие желательность его применения q_j в данном подмножестве. При этом

$$\sum_j^R q_j = 1,$$

где R – мощность подмножества вариантов для данной задачи управления.

Тогда вектор альтернативных вариантов формируется в виде:

$$Y^* = \begin{cases} Y_j \in Y^*, & \text{если } q_j > 0, \\ Y_j \notin Y^*, & \text{если } q_j = 0. \end{cases} \quad j=1, \dots, R. \quad (12)$$

Упорядочение альтернатив при использовании различных методов совпадают крайне редко и, как правило, в тех случаях, когда решение исходной задачи очевидно. Таким образом, возникает задача выбора метода многокритериальной оптимизации (метода оценивания альтернатив). Она заключается в выборе метода M^* из исходного множества методов $M_0 = \{M_1, M_2, \dots, M_l, \dots, M_R\}$ (где R – мощность множества), в наибольшей степени соответствующего семантике задачи Zd_l и мощности множества альтернативных вариантов Y^* :

$$M^* = C_3(Zd_l, Y^*, M_0), \quad (13)$$

где C_3 – эвристическая функция выбора, смысл которой приведен ниже.

Анализ задач, решаемых ЛПР при эксплуатации ТС, показал, что в качестве методов расчета оценки можно применять следующие: 1) спектральный; 2) нечеткий интеграл; 3) метод, основанный на принципе Парето; 4) метод суммы рангов; 5) метод свёртки.

Два первых метода следует применять для оценки альтернатив в том случае, если цели (критерии) взаимозависимы. Для задач с независимыми критериями следует производить оценку на основе методов свёртки или суммы рангов в зависимости от предпочтений ЛПР. Для метода свёртки используется количественная шкала оценки, а метод ранжирования предполагает определение рангов альтернатив. При выборе только одной альтернативы из множества альтернатив удобно использовать третий метод.

Решение задачи упорядочения вектора альтернативных вариантов решений заключается в нахождении интегральной оценки каждого варианта с использованием выбранного метода оценивания. Рассмотрим модели механизмов оценки.

ВЫБОР ВАРИАНТА ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ

Выбор на основе принципа Парето.

Эффективным по Парето считается такое решение из имеющегося множества допустимых решений, что в этом множестве не существует никакого другого решения строго лучшего, чем рассматриваемое (строго лучшее означает «не хуже» по всем показателям и «лучше» хотя бы по одному). Пусть Y_1, Y_2, \dots, Y_i – варианты решений, $f_{l k j}(Y_i)$ – оценка i -го варианта l -м экспертом в k -й ситуации по j -й цели, $i = \{1, n\}$, $l = \{1, L\}$, $k = \{1, K\}$, $j = \{1, J\}$. Вместе с тем Y_i признается неэффективным и исключается из рассмотрения, если найдется такое решение Y_s , для которого

$$\begin{aligned} <Y_i, Y_s> : f_{l k j}(Y_i) \leq f_{l k j}(Y_s) \quad \forall (l, k, j) \ \& \\ \exists (l_0, k_0, j_0) f_{l_0 k_0 j_0}(Y_i) < f_{l_0 k_0 j_0}(Y_s) \Rightarrow Y_s. \end{aligned} \quad (14)$$

Метод свёртки [7].

Обобщенным критерием в многокритериальной задаче может служить свёртка функций предпочтения. При этом задача становится однокритериальной и решения упорядочиваются по принципу: чем больше значение свёртки, тем оно лучше. На практике обычно используют линейную свёртку, в которой функция предпочтения $f_{l k j}(Y_i)$ выражена в количественной шкале, в едином масштабе:

$$F(Y_i) = \sum_l \sum_k k k_l \cdot w_{l k j} \cdot f_{l k j}(Y_i), \quad (15)$$

где $k k_l$ – коэффициент компетентности эксперта;

$w_{l k j}$ – вес цели (критерия).

Метод суммы рангов [8].

Обобщенным критерием данного метода выступает сумма рангов, выставленных l -м экспертом для i -го варианта решения по степени удовлетворения j -му критерию в k -й ситуации $f_{lkj}(Y_i)$. Решения упорядочиваются по принципу: чем меньше обобщенный критерий, тем лучше решение. Обобщенный критерий находится по зависимости

$$F(Y_i) = \sum \sum k k_i \cdot f_{lkj}(Y_i). \quad (16)$$

Нечеткий интеграл [9].

Пусть $K = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ – множество критериев (целей); $h: K \rightarrow [0, 1]$ – частная оценка решения, т. е. $h(s_i)$ – оценка варианта решения по критерию s_i ; g – субъективная нечеткая мера, выражающая степень важности критерия из множества K . Тогда обобщенная оценка e определяется путем вычисления нечеткого интеграла от h по g на множестве K :

$$e = \int_K h(s) \circ g = \sup_{\alpha \in [0, 1]} (\alpha \wedge g(K \cap H_\alpha)) \quad (17)$$

где $H_\alpha = \{s \mid h(s) \geq \alpha\}$.

Спектральный метод [10].

Пусть имеется n вариантов решений Y_i , охарактеризованных двузначными критериями P_j . Пусть $T = (f_{ij})$ – таблица размера $n \times J$, которая составлена из нулей и единиц и в которой i -я строка отвечает решению Y_i ($i=1 \dots n$), j -й столбец отвечает признаку P_j ($j=1 \dots J$); таблица T отражает соответствие варианта решения определенному критерию: если для i -го решения и j -го критерия степень соответствия превышает некоторый уровень, то $f_{ij}=1$ и $f_{ij}=0$ – в противном случае. Варианты решений, у которых все оценки равны нулю, из рассмотрения исключаются.

Метод основан на определении нагрузки строк и столбцов ($\omega = (\omega_1, \dots, \omega_n)$ и $\pi = (\pi_1, \dots, \pi_J)$ соответственно). Нагрузка определяется по количеству единиц в строках и столбцах таблицы T . Определение предельной нагрузки осуществляется в ходе пересчетов, называемых «качелями», смысл которых заключается в следующем.

Исходя из таблицы T и пары векторов $w = (\omega_1, \dots, \omega_n)$ и $p = (\pi_1, \dots, \pi_J)$, определяют пару векторов $w' = (\omega'_1, \dots, \omega'_n)$ и $p' = (\pi'_1, \dots, \pi'_J)$, а также нормирующие множители α , β и пару векторов \tilde{w} и \tilde{p} :

$$\begin{aligned} w' = T(p), \text{ т. е. } w'_i = f_{i1}p_1 + \dots + f_{iJ}p_J, \tilde{w} = \alpha \cdot w', \\ i = 1, \dots, n, |\tilde{w}| = 1; \\ p' = T^*(w), \text{ т. е. } p'_j = f_{1j}w_1 + \dots + f_{nj}w_n, \tilde{p} = \beta \cdot p', \\ j = 1, \dots, J, |\tilde{p}| = 1. \end{aligned} \quad (18)$$

Эти формулы дают формальное представление пересчетов. Итерационный процесс заканчивается, если только одно из значений вектора \tilde{w} равно единице. Варианты решений ранжируются по принципу: чем больше значение нагрузки у варианта, тем лучше.

Как показал анализ модели задачи многокритериального выбора варианта восстановления работоспособности ТС, для составляющих ее подзадач классификации ситуации, генерации вариантов решений, генерации вектора критериев (целей), выбора метода оценивания наиболее приемлемым для представления является метод, основанный на семиотическом моделировании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, задача многокритериального выбора варианта восстановления работоспособности ТС по характеру исходных данных и методам решения является слабо структурированной, а представление и решение данной задачи с использованием методов искусствен-

ного интеллекта в наибольшей степени соответствуют ее семантике. Использование методов субъективного оценивания, на которых основана модель, позволяет выбрать рациональный вариант в тех случаях, когда затруднено получение численных оценок эффективности альтернативных вариантов решений.

Список используемых источников

1. Функция восстановления и оптимизация стратегий эксплуатации технических систем при наработках, распределенных как смесь распределений / И. И. Вайнштейн [и др.] // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. – 2017. – Т. 18, № 1. – С. 15–24.
2. Особенности аналитико-имитационного моделирования функционирования сложных объектов управления в условиях деструктивных воздействий / Е. Н. Алёшин [и др.] // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2022. – Вып. 683. – С. 6–12.
3. Лисицкий В. В., Мартынов А. М. Концепция адаптивного ситуационного синтеза структур системы эксплуатации сложных технических систем // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2022. – Вып. 684. – С. 256–264.
4. Комбинированный метод многокритериального выбора управленческих решений на основе моделей представления знаний и планирования эксперимента / А. А. Павлов [и др.] // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2017. – Вып. 656. – С. 9–17.
5. Дуленко В. А., Пестриков В. А., Курочкина К. В. Методика формирования и пополнения базиса типовых ситуаций в системах поддержки принятия решений по обеспечению информационной безопасности // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2014. – Т. 18, № 3(64). – С. 270–275.
6. Захаров А. О. Сужение множества Парето на основе замкнутой информации об отношении предпочтения ЛПР // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. – 2009. – № 4. – С. 69–83.
7. Власов В. А., Радионов Н. В., Яхваров Е. К. Применение методов исследования операций для решения задач оценивания оптимальных объемов финансирования разработок космического вооружения и техники // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2021. – Вып. 679. – С. 27–37.
8. Боровской Е. П., Кохановский А. Г., Кузнецов А. Б. Обоснование выбора объектов наземного технологического оборудования стартовых комплексов, требующих дополнительного контроля технического состояния на основе аддитивной свертки частных показателей // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2021. – Вып. 676. – С. 171–178.
9. Сакулин С. А., Алфимцев А. Н. Выбор операторов агрегирования пользовательских критериев для оценки удобства веб-страниц // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2017. – Т. 21, № 1(120). – С. 90–102. – DOI: 10.21285/1814-3520-2017-1-90-102.
10. Lipatnikov V. A., Kuzin P. I., Rabin A. V. The method of increasing the reliability of noise immunity when receiving information in radio communication systems of the SHF and EHF ranges // Journal of Physics: Conference Series. Krasnoyarsk, Russian Federation / Institute of Physics and IOP Publishing Limited. – Krasnoyarsk, 2020. – Vol. 1679. – P. 52100. – DOI: 10.1088/1742-6596/1679/5/052100.

С. М. Беседин,
кандидат военных наук, доцент;
А. В. Ерофеев,
кандидат военных наук, доцент;
В. О. Кацик,
кандидат технических наук, доцент

ФОРМИРОВАНИЕ ГОТОВНОСТИ КУРСАНТОВ К РАБОТЕ В СОСТАВЕ УЧЕБНЫХ РАСЧЕТОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ТАКТИКО-СПЕЦИАЛЬНОГО УЧЕНИЯ

В статье на основе опыта проведенных практических занятий и учений предложены приемы формирования готовности курсантов к работе в составе учебных расчетов при проведении тактико-специального учения по выполнению воинской частью задач по предназначению.

Ключевые слова: тактико-специальное учение, готовность, слаживание, взаимодействие, учебные расчеты.

Одним из основных направлений дальнейшего развития ВС РФ является совершенствование боевой подготовки войск. В этих условиях существенно возрастает уровень требований к профессиональной компетентности будущих офицеров, особенно в выработке готовности выполнять свои функциональные обязанности в различных условиях обстановки. Одним из элементов такой готовности является слаженность работы расчетов при выполнении задач по предназначению. *Слаживание* – это один из важнейших элементов тактико-специальной подготовки, представляющий собой целенаправленное обучение военнослужащих согласованным действиям в составе боевого расчета (подразделения), в ходе которого вырабатываются и совершенствуются умения и навыки, необходимые для четкого выполнения функциональных обязанностей и согласованного выполнения поставленных задач [1, 2].

Результаты анализа учебного процесса показывают, что в настоящее время уделяется недостаточно внимания разрешению проблемы обучения будущих офицеров военно-технических вузов действиям в составе боевых расчетов с целью формирования у них слаживания действий. Имеющиеся же методики по совершенствованию слаживания действий курсантов в основном относятся к приобретению умений и навыков слаживания в условиях общевойскового боя.

Для приближения учебного процесса к реалиям боевой обстановки необходимо рассматривать процесс слаживания учебных боевых расчетов в условиях подготовки и проведения тактико-специального учения (ТСУ). Тактико-специальное учение является высшей формой процесса формирования у курсантов профессиональных компетенций на завершающем этапе обучения.

На ТСУ курсанты разных специальностей действуют в составе органов управления воинской части и расчетов подразделений, решая задачи по обслуживанию космических средств в простой и сложной тактической обстановке. Действия расчетов, обслуживающих данные средства, должны быть слажены, с предельной точностью распределены во времени и пространстве, личный состав обязан владеть достаточным уровнем компетенций, полученных на предшествующих ТСУ, практических и тактико-специальных занятиях в соответствии с учебной программой [3, 4].

Вместе с тем необходимо учитывать тот факт, что на ТСУ в учебном заведении действуют расчеты курсантов, не имеющие войскового опыта участия в данной форме обучения. По этой причине они не имеют достаточного опыта слаживания и взаимодействия расчетов, привлекаемых к выполнению задач по предназначению. В связи с данным обстоятельством

решения обучающихся в ходе ТСУ по ситуационным вводным применения специальных технических систем часто имеют поверхностный характер, без углубленной оценки обстановки и отсутствия учета возможностей взаимодействующих расчетов. В процессе проведения ТСУ, в зависимости от ситуации, обучающиеся часто обращаются к посреднику-преподавателю за консультациями, на которые затрачивается оперативное время. В результате время, потраченное обучающимися на принятие решения, отстает от оперативного времени, установленного замыслом ТСУ, нарушается слаженность действий расчетов при выполнении учебных задач.

Цель проведенного исследования заключается в выявлении основных подходов к формированию слаживания действий будущих офицеров при их обучении в военно-техническом вузе и выявлении основных методов и приемов слаживания учебных расчетов наземного комплекса управления космическими аппаратами (НКУ КА) при решении специальных задач в процессе проведения тактико-специального учения.

Слаживание – это обучение личного состава учебных расчетов различных специальностей согласованным совместным действиям при выполнении задач по предназначению. Оно способствует определению содержания, места и времени действий каждого номера и расчета в целом при выполнении общей задачи подразделениями наземного комплекса управления космических аппаратов (НКУ КА).

Достигается слаживание учебных расчетов целенаправленными действиями обучающихся в периоды подготовки и проведения ТСУ. В эти периоды усилия штаба руководства и посредников-преподавателей по слаживанию расчетов НКУ направлены на обучение действиям следующих формирований (рис. 1):

- расчетов подразделений специальных технических систем;
- операторов органа управления подразделениями;
- расчетов всестороннего обеспечения подразделений.

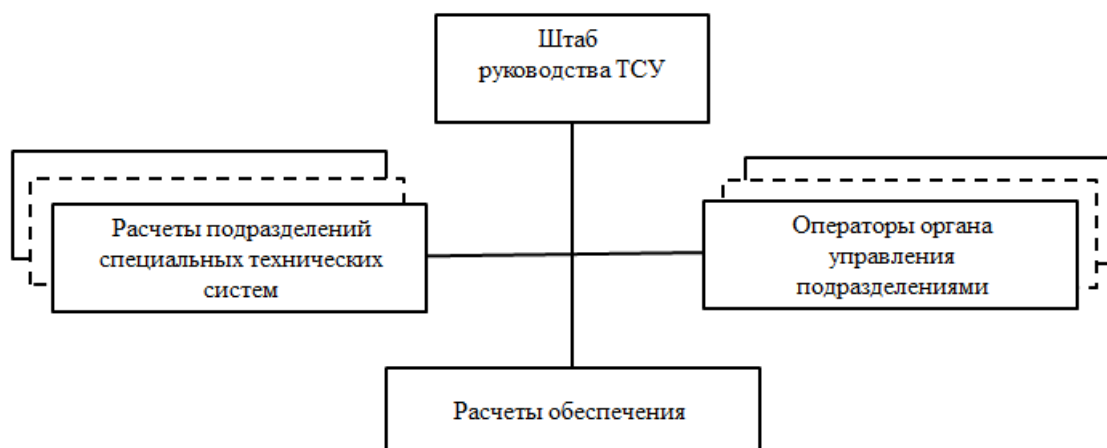


Рис. 1. Состав слаживаемых расчетов на ТСУ

Указанные на рис. 1 расчеты обязаны выполнять задачи на постах и пунктах управления, руководствуясь следующими документами:

- тактическим заданием на ТСУ;
- планом применения средств НКУ в соответствии с замыслом ТСУ;
- специальной технической документацией;
- формами документов по управлению подразделениями;
- Журналом учета данных обстановки;
- справочными данными по составу средств НКУ;
- инструкциями по работе на средствах НКУ;

– инструкциями по правилам и мерам безопасности.

Учитывая тот факт, что обучающиеся впервые участвуют в ТСУ, штабу руководства и преподавателям-посредникам необходимо весь процесс проведения ТСУ условно разбить на два отдельных этапа:

- 1) период подготовки к ТСУ;
- 2) период проведения ТСУ.

При этом особое внимание следует уделить периоду подготовки к учению, так как практика проведения учений показывает, что этому периоду уделяется мало времени. В период подготовки к учению следует сосредотачивать внимание курсантов на следующих направлениях.

1. Основой действий на ТСУ органов управления, технических расчетов НКУ и расчетов всестороннего обеспечения при подготовке и выполнении ими задач по предназначению является учебный «План применения средств НКУ», разрабатываемый в соответствии с замыслом ТСУ. В связи с этим по каждому сеансу управления КА «Плана...» обучающимся необходимо заранее уяснить исходные технологические данные, целеуказания, командно-программную информацию, время зон радиовидимости и особенности сеанса управления КА.

2. Все участвующие в ТСУ расчеты при подготовке к выполнению специальных задач руководствуются следующими законами управления войсками:

- закон совместимости технических средств и систем управления с подчиненными и взаимодействующими звеньями;
- закон соответствия потребного (T_p) и располагаемого (T_r) времени при решении задач управления войсками (то есть $T_p < T_r$).

3. Опыт проведенных в разные годы учений показал, что оперативность аналитического мышления курсантов при оценке обстановки и принятии решений зачастую не вписывается в рамки времени, отводимого на выполнение задач по вводным, выдаваемым посредниками в ходе учения. В связи с данным обстоятельством можно на этапе подготовки к учению включать в «Тактическое задание на ТСУ» тренировочные вводные, подобные по характеру содержания вводным «Плана наращивания обстановки на ТСУ». При подготовке к ТСУ обучающиеся могут использовать их как тренировочный учебный материал для повышения оперативности и качества содержания принимаемых решений в ходе учения.

4. На этапе подготовки к учению, в качестве примера, в «Тактическом задании на ТСУ» следует разместить схемы последовательности решения специальных задач, требующих слаженных действий при их выполнении взаимодействующими расчетами [6], как показано на рис. 2.



Рис. 2. Вариант состава слаживаемых расчетов при выполнении задачи приема, предварительной обработки и передачи траекторной информации в центр управления полетом (ЦУП КА)

В приведенном выше варианте состава обучающихся положительный результат слаженности действий расчетов может быть получен только при выполнении следующих условий:

- целенаправленные действия учебных расчетов в процессе применения средств НКУ;
- взаимный контроль слаженных действий каждого расчета при работе с информацией;
- возможность выполнения сеанса управления КА в пределах располагаемого времени;
- техническая готовность применяемых для выполнения задачи средств НКУ;

5. Для оказания помощи обучающимся при возникновении различных ситуаций, способных нарушить слаженный процесс управления КА, предлагается также поместить в «Тактическое задание на ТСУ» перечень инструкций специально-технического характера. Этими инструкциями обучающиеся могут пользоваться при возникновении следующих ситуаций:

- нарушения технологического процесса применения средств НКУ;
- отказов технических средств НКУ;
- нарушения связи между взаимодействующими расчетами;
- выхода действий слаживаемых расчетов за рамки располагаемого времени;
- при возникновении нештатных ситуаций;
- нарушения требований руководящих документов.

Разработанные специальными кафедрами образцы инструкций по действиям обучающихся в подобных ситуациях могут способствовать выработке у них профессиональных компетенций при выполнении задач по предназначению. Задачей обучающихся расчетов является уяснение данных инструкций и их использование на ТСУ в совместной работе. В период подготовки к ТСУ рекомендуется проведение обязательных консультаций по теме ТСУ.

В период проведения ТСУ процесс слаживания учебных расчетов может начинаться с уяснения обстановки, заданной замыслом ТСУ, и продолжаться при выполнении каждой задачи по предназначению согласно «Плану применения средств НКУ». Расчеты специальных технических систем, с целью выполнения специальных задач, могут использовать следующие приемы слаживания.

1. Определять взаимодействующими расчетами совместимость применяемых при решении задачи специальных технических средств.

2. Проверять готовность слаживаемых расчетов и аппаратуры к обработке информации, получаемой в процессе проведения сеансов управления КА.

3. Проверять готовность расчетов связи, использовать различные принципы построения каналов связи.

4. Проверять готовность расчетов управления КА к взаимодействию с расчетами средств радиоэлектронного противодействия.

5. Проверять подготовленность слаживаемых расчетов к действиям по устранению нештатных ситуаций.

Мероприятия, направленные на достижение слаженности расчетов, рекомендуется постоянно отслеживать посредниками-преподавателями, которые на ТСУ выполняют функции не только контроля, но и обучения расчетов согласованным действиям. Эти действия по уровню исполнения должны быть близки к действиям штатных расчетов в войсках.

Предлагаемый метод заблаговременного вручения «Тактического задания на ТСУ» с инструкциями по слаживанию при изменении обстановки допустим как способ первоначального обучения технических расчетов профессиональным действиям на предстоящем ТСУ. Он позволяет обучающимся более целенаправленно в ходе учения уяснять изменения в обстановке и их влияние на взаимодействующие звенья, что способствует принятию решений, адекватных обстановке, приобретению прочных навыков действий при выполнении задач в составе сложной специальной технической системы.

Задачи, выполняемые слаженными расчетами специальных технических систем, в соответствии с планами ЦУП должны находиться под контролем учебного органа управления подразделениями воинской части.

Действия операторов учебного органа управления подразделениями на ТСУ охватывают весь комплекс задач по руководству расчетами специальных технических систем, а также расчетами всестороннего обеспечения и поддержания готовности подразделений к выполнению задач по предназначению. Основой слаживания при решении этих задач являются знания, умения и навыки, приобретенные при изучении вопросов по программам военных дисциплин. Действия операторов, входящих в состав органа управления, осуществляются на ко-

мандном пункте, оборудованном современными информационными системами и средствами связи.

Каждому оператору органа управления необходимо вручать задание, в котором изложены его обязанности по исполняемой должности и взаимодействию с другими операторами. Это способствует пониманию им своей задачи в составе органа управления.

Процесс слаживания подразделений воинской части, действия органа управления, должностных лиц и расчетов осуществляются на основании разрабатываемых обучающимися в соответствии с замыслом ТСУ приказов, распоряжений, донесений, планов, заявок и других документов по поддержанию боевой готовности и выполнению задач в изменяющихся условиях обстановки. Фактически эти документы не только обеспечивают слаженность действий, но также являются основой для формирования у обучающихся компетенций, способствующих уверенным профессиональным действиям и успешному решению задач по предназначению. Для разработки названных документов необходим достаточный опыт практической работы обучающихся по специальности и управлению подразделениями. На начало проведения учебного ТСУ в вузе такой опыт у обучающихся незначителен.

Чтобы изменить данное положение, предлагается использовать метод вручения обучающимся на ТСУ типовых образцов исполненных документов по управлению расчетами для различных условий тактической обстановки согласно замыслу ТСУ [4]. Типовые образцы документов для наиболее вероятных условий обстановки выполняются в виде установленных форм с примерным содержанием. На основании этих форм обучающиеся разрабатывают документы, соответствующие реальной обстановке, в которых излагаются указания должностным лицам и подразделениям, направленные на слаженные действия при выполнении задач по предназначению.

Предложенный подход способствует достижению учебных целей слаживания действий обучающихся, а также формированию компетенций, необходимых при решении специальных и тактических задач в сложных условиях обстановки. Указанный подход был внедрен в процесс обучения по результатам проведенного педагогического эксперимента [5] и прошел проверку на практических и тактико-специальных занятиях по дисциплине кафедры оперативного искусства и тактики [6].

На основе всего вышеизложенного можно сделать следующие выводы по совершенствованию процесса формирования готовности курсантов к работе в составе учебных расчетов наземного комплекса управления космическими аппаратами:

- существующая процедура подготовки курсантов к самостоятельной работе в процессе проведения тактико-специального учения не в полной мере обеспечивает качественное выполнение ими главной задачи воинской части по предназначению;
- разработанные авторами методические приемы позволяют повысить готовность курсантов к работе в составе боевых расчетов на основе совершенствования слаженности их действий.

Предлагаемые методические приемы способствуют совершенствованию подготовки и слаживанию действий учебных расчетов на ТСУ, не нарушая установленный порядок его организации. Реализация предлагаемых методических приемов прошла апробацию на практических и тактико-специальных занятиях с выпускниками-специалистами по управлению КА и получила положительную оценку преподавателей.

Результаты реализации предлагаемых методов и приемов по совершенствованию слаживания учебных боевых расчетов курсантов в процессе проведения тактико-специального учения показали, что при их применении вырос уровень профессиональной компетенции будущих офицеров. Кроме того, они позволили существенно повысить уровень боевой подготовки выпускников вуза.

Список используемых источников

1. 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. – МО РФ, 2022. – 72 с.
2. Выступление на расширенной Коллегии Министерства обороны России 21 декабря 2021 года Президента Российской Федерации – Верховного Главнокомандующего Вооруженными Силами Российской Федерации Владимира Путина // Армейский сборник. – 2022. – № 1. – С. 5–6.
3. *Остроумова Ю. С.* Совершенствование подготовки военно-инженерных кадров к решению наукоемких профессиональных задач : моногр. – СПб. : ВАС, 2019. – 240 с.
4. Документация группы боевого управления учебного ОКИК : учебно-метод. пособие / С. М. Беседин [и др.]. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2013. – 48 с.
5. *Ерофеев А. В.* Отчет о педагогическом эксперименте / науч. руководитель Б. Д. Казахов. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2014. – 12 с.
6. Тактика сил запуска и управления космическими аппаратами: задачник / А. В. Ерофеев [и др.]. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2018. – 76 с.

Д. А. Булекбаев,

доктор технических наук, доцент;

А. В. Морозов,

кандидат физико-математических наук, профессор

К ВОПРОСУ ОБУЧЕНИЯ ОБЫКНОВЕННЫМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМ УРАВНЕНИЯМ В ТЕХНИЧЕСКОМ ВУЗЕ

Основными задачами исследования дифференциальных уравнений являются: 1) нахождение всех решений данного уравнения; 2) изучение их свойств. Вторую задачу из-за проблем дефицита учебного времени часто в технических вузах в ряде случаев просто не рассматривают. С другой стороны, вид полученного общего решения (общего интеграла) бывает столь громоздким, что его анализ становится необозримым, а порой невозможным, а следовательно, полученная формула оказывается бесполезной. В таких случаях остается искать другой подход к исследованию, в частности прибегать к численному интегрированию дифференциальных уравнений и сопоставлению (верификации) аналитической формулы решения с численным расчетом. В таком сочетании двух подходов возрастает образовательный эффект в целом. В настоящей статье предлагается методика, основанная на комплексном подходе к проведению практических занятий по теме «Обыкновенные дифференциальные уравнения», включающая как аналитическое решение, так и численное. Отметим, что использование в курсе дифференциальных уравнений элементов численного интегрирования с визуализацией решения делает изучение дифференциальных уравнений значительно более глубоким и отвечающим современным требованиям к обучению. Исследуемая проблема продемонстрирована на трех примерах.

Ключевые слова: обучение исследованию дифференциальных уравнений, эквивалентные формы дифференциальных уравнений первого порядка, анализ свойств интегральных кривых качественными методами, анализ свойств интегральных кривых на плоскости с помощью ПК.

ВВЕДЕНИЕ

Ключевой задачей курса математического анализа во втузе является изучение свойств функций одной, двух и более переменных методами теории пределов [1]. Известно, что функцию можно задать аналитически, т. е. формулой или формулами, таблично, графически, но можно и с помощью уравнений, например: дифференциальных, интегральных, функциональных. Так, ставя задачу Коши для обыкновенного дифференциального уравнения, мы в общем случае задаем некоторую функцию (решение) «неявным образом», которую необходимо найти в случае ее существования, а учитывая основную задачу математического анализа, и изучить ее свойства. Более того, учитывая, что дифференциальные уравнения в общем случае задают не одну функцию, а множество, вопрос может быть поставлен шире, а именно: найти все семейство решений и изучить его свойства. Таким образом, теория обыкновенных дифференциальных уравнений образовала ветвь математического анализа и превратилась в мощный инструмент исследования научных и научно-технических проблем. Указанная теория в настоящее время включает ряд научных направлений. Отметим важнейшие из них. Это общая теория дифференциальных уравнений [2–6], аналитическая теория дифференциальных уравнений [7], качественная теория дифференциальных уравнений [8–10], математическая теория устойчивости [11, 12], асимптотические методы решения дифференциальных уравнений [13, 14], численные методы решения дифференциальных уравнений [15, 16].

В общем курсе высшей математики втузов изучают основы общей теории обыкновенных дифференциальных уравнений: некоторые классы уравнений 1-го порядка, интегрируемые в квадратурах, теоремы существования и единственности, линейные дифференциальные уравнения с постоянными коэффициентами и системы таких уравнений.

В настоящей статье рассматривается возможная *методика построения практических занятий* по теме «Основные типы дифференциальных уравнений, интегрируемые в квадрату-

рах». Методика включает два этапа: аналитический и вычислительный. Второй этап играет важную роль в тех нередких случаях, когда выражение общего решения или общего интеграла представляет собой трудно анализируемую формулу. Такие случаи возникают, когда решение получено, например, в неявной форме и ее анализ затруднен. Эту проблему отмечали и отмечают многие специалисты по дифференциальным уравнениям [2, 4]. Учащиеся, сопоставляя результаты проведенных этапов решения, приходят к более глубокому пониманию как постановки задачи, так и методов ее решения. Тем самым достигается более высокий уровень понимания решаемой ими задачи. В качестве инструмента численного анализа мы рекомендуем использовать ППП WinSet [17] – программный продукт, разработанный специально для моделирования интегральных кривых дифференциальных уравнений и отображений. Особенностью его являются простота и естественность интерфейса, вследствие чего временных потерь на его обучение не будет [18, 19].

ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ ФОРМЫ ЗАПИСИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ

Напомним, что при решении дифференциальных уравнений 1-го порядка часто приходится использовать различные эквивалентные формы их записи, даже в рамках рассмотрения одной задачи. Перечислим эти формы и напомним некоторые понятия из теории дифференциальных уравнений.

Первая форма имеет вид

$$P(x, y)dx + Q(x, y)dy = 0 \quad (1)$$

и называется уравнением в дифференциалах.

Вторая – представляет собой уравнение, разрешенное относительно производной $y'(x)$ (или $x'(y)$)

$$\frac{dy}{dx} = \frac{P(x, y)}{Q(x, y)} \left(\text{или} \frac{dx}{dy} = \frac{Q(x, y)}{P(x, y)} \right). \quad (2)$$

При этом в ряде случаев приходится использовать оба этих уравнения.

Третья форма имеет вид двух уравнений:

$$\begin{cases} x' = P(x, y), \\ y' = Q(x, y). \end{cases} \quad (3)$$

Она называется автономной системой. Здесь $x' = \frac{dx}{dt}$, $y' = \frac{dy}{dt}$, а t – параметр.

Предполагается, что функции $P(x, y)$ и $Q(x, y)$, входящие в уравнения (1)–(3), являются непрерывными в некоторой области $G \subset R^2$ и для них выполняется теорема существования и единственности решения задачи Коши [2].

Обратим внимание на терминологию, которая используется при рассмотрении математических моделей (1)–(3).

Говорят, что функция $f(x, y) = \frac{P(x, y)}{Q(x, y)}$ задает в области $G \subset R^2$ поле направлений, т. е. поле касательных отрезков к интегральным кривым, проходящим через соответствующие точки. Если $P(x_0, y_0) = 0$ и $Q(x_0, y_0) = 0$, то точку (x_0, y_0) называют *особой точкой* уравнения (1) [уравнения (2)] и *положением равновесия* системы уравнений (3). Решением уравнений (1)–(3) называют в общем случае пару непрерывно дифференцируемых функций $x = \varphi(t)$, $y = \psi(t)$, $t \in (\alpha, \beta)$, подстановка которых в соответствующие уравнения обращает их в тождества. Следует отметить, что областью определения любого решения является *интервал*, т. е. связанное множество числовой оси. Кривая на плоскости xOy , отвечающая решению, называется *интегральной кривой*. Множество точек на плоскости, задаваемое некоторой формулой, называется *интегральным*, если оно состоит из *интегральных кривых* [20]. При

рассмотрении системы (3) интегральная кривая часто называется *траекторией*, при этом параметр t именуют временем, а $F(x, y) = \{P(x, y), Q(x, y)\}$, $(x, y) \in G$ – векторным полем.

ПРИМЕРЫ КОМПЛЕКСНОГО ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЙ

Пример 1. Рассмотрим уравнение в дифференциалах

$$xdy - y(2 + 3xy)dx = 0. \quad (4)$$

Требуется:

1. Провести анализ поля направлений.
2. Проинтегрировать уравнение, результатом чего должно быть построение формулы общего решения (общего интеграла).
3. Решить задачу Коши с начальным условием $y(1) = -\frac{2}{3}$.
4. Изобразить семейство интегральных кривых на плоскости, используя *WinSet* [17–19].

Прежде всего, отметим два очевидных решения уравнения (4): $x = 0$ и $y = 0$.

Для установления свойств уравнения (4) представим его в эквивалентном виде

$$\frac{dy}{dx} = \frac{y}{x}(2 + 3xy). \quad (5)$$

Откуда следует:

1. $(0, 0)$ – является особой точкой уравнения (5).
2. Поле направлений уравнения (5) симметрично относительно начала координат (это следует из того, что его правая часть f обладает свойством $f(-x, -y) = f(x, y)$). Это, в свою очередь, порождает центральную симметрию всего семейства кривых.
3. Гипербола $y = -\frac{2}{3x}$, в точках которой $y' = 0$, является линией максимумов при $x < 0$ и минимумов при $x > 0$ для интегральных кривых.
4. Линеаризация уравнения (5) в окрестности начала координат показывает, что все интегральные кривые являются парабололами и касаются оси x .

Полагая, что $x \neq 0$, $y \neq 0$, запишем уравнение (1) в эквивалентной форме:

$$d(xy) - 3xy(xy + 1) \frac{dx}{x} = 0$$

или, что то же самое, $\left(\frac{1}{xy} - \frac{1}{xy+1}\right) d(xy) = 3 \frac{dx}{x}$.

Отсюда, интегрируя, находим *общий интеграл* уравнения (4)

$$x^2(xy + 1) = Cy, \quad C \in R. \quad (6)$$

Заметим, что при $C = 0$ и $C = \infty$ формула (6) включает уже известные решения $x = 0$ и $y = 0$, а также два *нетривиальных* решения $y = -\frac{1}{x}$ с областями определения $(-\infty, 0)$ и $(0, +\infty)$. Из (6) легко находится *общее решение*

$$y(x) = \frac{x^2}{C - x^3}. \quad (7)$$

Замечание. Исходное уравнение есть известное уравнение Бернулли, так что формула (7) могла быть получена стандартным приемом интегрирования [5, 6].

Для нахождения решения задачи Коши подставим в (7) начальные данные $x = 1, y = -\frac{2}{3}$ и найдем $C = -\frac{1}{2}$. Тогда формула $y(x) = \frac{-2x^2}{1-2x^3}$ будет определять на плоскости интегральное

множество, включающее три интегральные кривые: первую при $x \in \left(-\infty, -\sqrt[3]{\frac{1}{2}}\right)$, вторую при $x \in \left(-\sqrt[3]{\frac{1}{2}}, 0\right)$ и третью при $x \in (0, +\infty)$.

Таким образом, решением поставленной выше задачи Коши будет функция

$$y(x) = \frac{-2x^2}{1 - 2x^3}, \quad 0 < x < +\infty.$$

Соответствующая *интегральная кривая* изображена красным цветом на рис. 1.

Для визуализации всего семейства интегральных кривых уравнения воспользуемся нашей программой, для чего запишем уравнение (4) в виде эквивалентной системы уравнений в стандартных обозначениях программы ($x = x_1, y = x_2$):

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_1, \\ \dot{x}_2 = -x_2(2 - 3x_1x_2). \end{cases} \quad (8)$$

Замечание. Вместо системы (8) можно рассмотреть также систему (смотри знаки в правой части)

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -x_1, \\ \dot{x}_2 = x_2(2 - 3x_1x_2). \end{cases} \quad (9)$$

или даже более общую

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = rx_1, \\ \dot{x}_2 = -rx_2(2 - 3x_1x_2). \end{cases} \quad (10)$$

где $r = r(x_1, x_2)$ – знакопостоянная непрерывная функция. Системы (8), (9) и (10) задают одно и то же множество интегральных кривых, отличие только в их параметризации.

На рис. 2 построены интегральные множества для $C \geq 0$ и $C \leq 0$. Красные линии соответствуют значению $C = 0$. Это гиперболы $y = -\frac{1}{x}$, которые играют роль сепаратрисных (разделительных) интегральных кривых. На рис. 3 представлена общая картина.

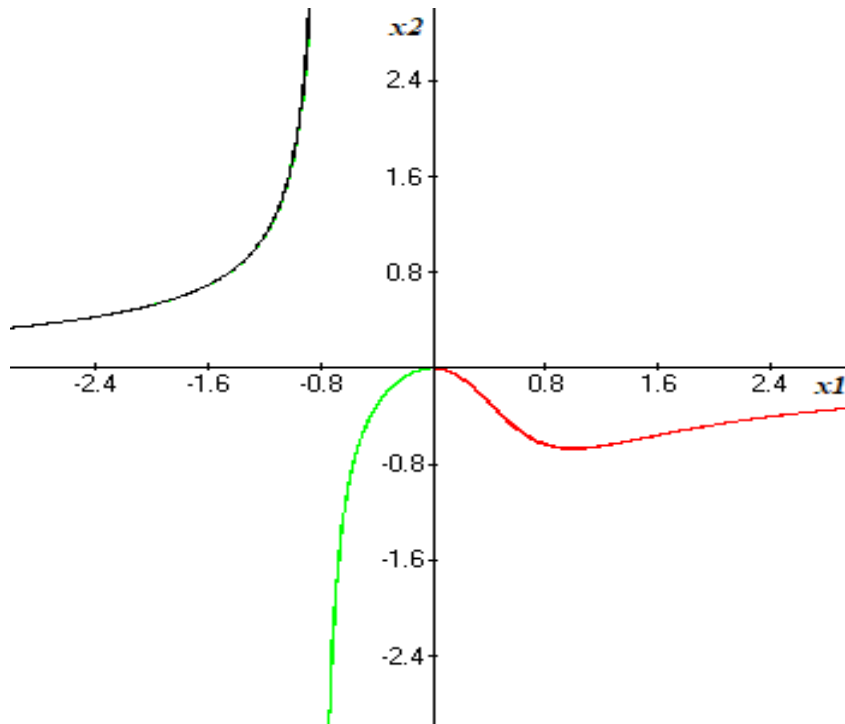


Рис. 1. Интегральное множество для $C = -0.5$, состоящее из трех интегральных кривых и особой точки $(0,0)$

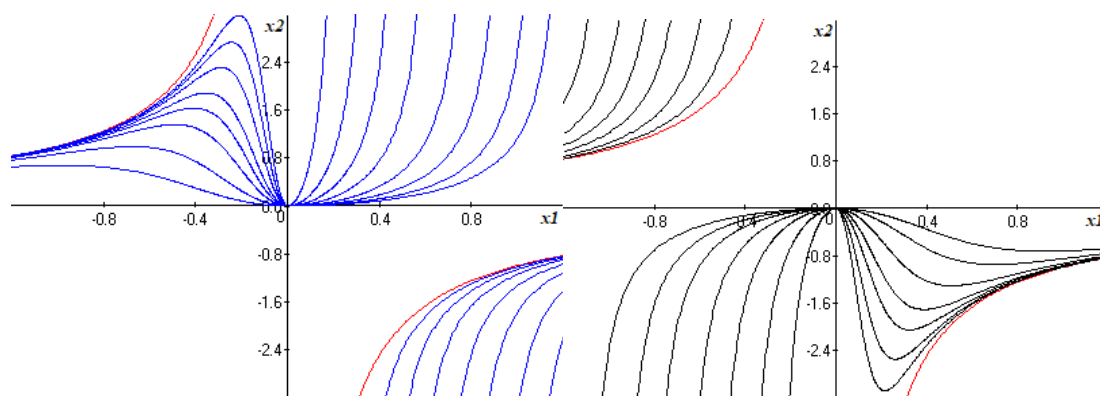


Рис. 2. Семейство интегральных кривых для $C > 0$ (слева) и для $C < 0$ (справа)

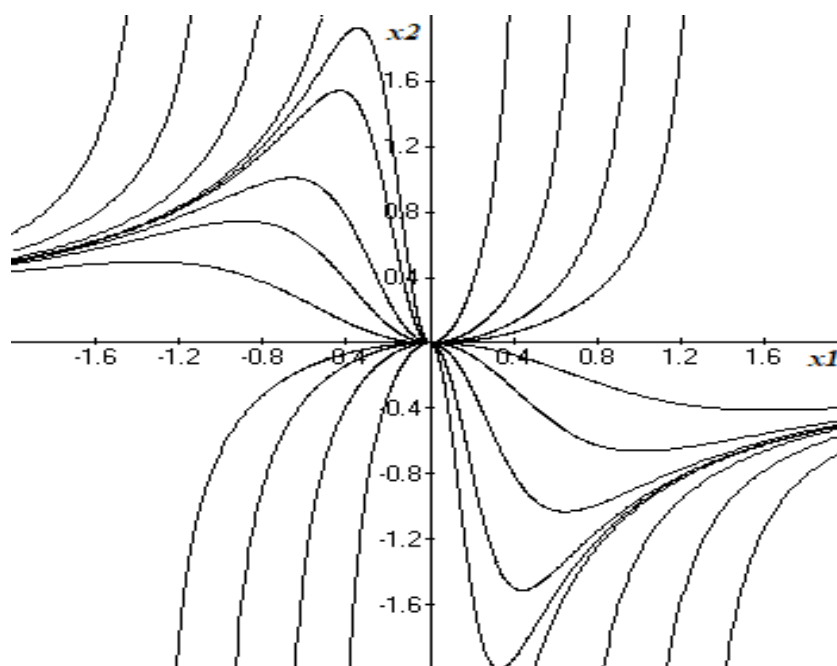


Рис. 3. Семейство всех интегральных кривых

В рассмотренном примере семейство интегральных кривых хорошо успевающий учащийся мог бы построить и сам, не прибегая к численному анализу. Правда, на это потребовалось бы значительное время. В следующих примерах задача построения интегральных кривых будет сложнее. Часто говорят, что значительно проще решить уравнение, чем исследовать семейство интегральных кривых. И таких примеров в курсе дифференциальных уравнений много.

Пример 2. Рассмотрим уравнение, разрешенное относительно производной [21],

$$\frac{dy}{dx} = \frac{y(\delta x - \gamma)}{x(\alpha - \beta y)}. \quad (11)$$

Здесь $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ – положительные числа (параметры). При этом будем считать, что правая часть определена в области $G: x \geq 0, y \geq 0$. Видно, что уравнение (11) имеет: две особые точки $(0, 0)$ и $(\frac{\alpha}{\beta}, \frac{\gamma}{\delta})$ и два тривиальных решения: $y = 0 (x > 0)$; $x = 0 (y > 0)$. Уравнение (11) легко интегрируется. Действительно, разделяя переменные

$$\frac{\alpha - \beta y}{y} dy = \frac{\delta x - \gamma}{x} dx$$

и интегрируя, получим $U(x, y) \equiv \delta x + \beta y - \gamma \ln x - \alpha \ln y = C$.

Как видно, получить общий интеграл совсем нетрудно. Кроме того, нетрудно показать, что интеграл $U(x, y)$ имеет в точке $\left(\frac{\alpha}{\beta}, \frac{\gamma}{\delta}\right)$ минимум. Труднее показать расположение кривых в окрестности особой точки. Покажем, что уравнению $U(x, y) = C > U\left(\frac{\alpha}{\beta}, \frac{\gamma}{\delta}\right)$ отвечают замкнутые интегральные кривые, называемые циклами. Для этого перейдем к полярным координатам r, φ : $x = \frac{\alpha}{\beta} + r\cos\varphi$, $y = \frac{\gamma}{\delta} + r\sin\varphi$ и вычислим частную производную:

$$U'_r = \frac{\delta r \cos^2 \varphi}{\frac{\gamma}{\delta} + r \cos \varphi} + \frac{\beta r \sin^2 \varphi}{\frac{\alpha}{\beta} + r \sin \varphi} > 0.$$

Отсюда следует, что функция $U(r, \varphi)$ возрастает по r на любом луче $\varphi = \varphi_0 = \text{const}$, исходящем из точки $\left(\frac{\alpha}{\beta}, \frac{\gamma}{\delta}\right)$, при этом U изменяется от числа $U\left(\frac{\alpha}{\beta}, \frac{\gamma}{\delta}\right)$ до бесконечности. Зададимся теперь положительным числом $C_0 > U\left(\frac{\alpha}{\beta}, \frac{\gamma}{\delta}\right)$. Тогда на любом луче $\varphi = \varphi_0 = \text{const}$ найдется единственная точка (φ_0, r_0) , в которой $U(\varphi_0, r_0) = C_0$, что и доказывает замкнутость всех интегральных кривых, вне зависимости от значений положительных параметров $\alpha, \beta, \gamma, \delta$.

В заключение примера запишем уравнение (11) в виде системы

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_1(\alpha - \beta x_2), \\ \dot{x}_2 = x_2(\delta x_1 - \gamma). \end{cases}$$

На рис. 4 показан результат численного моделирования интегральных кривых этой системы.

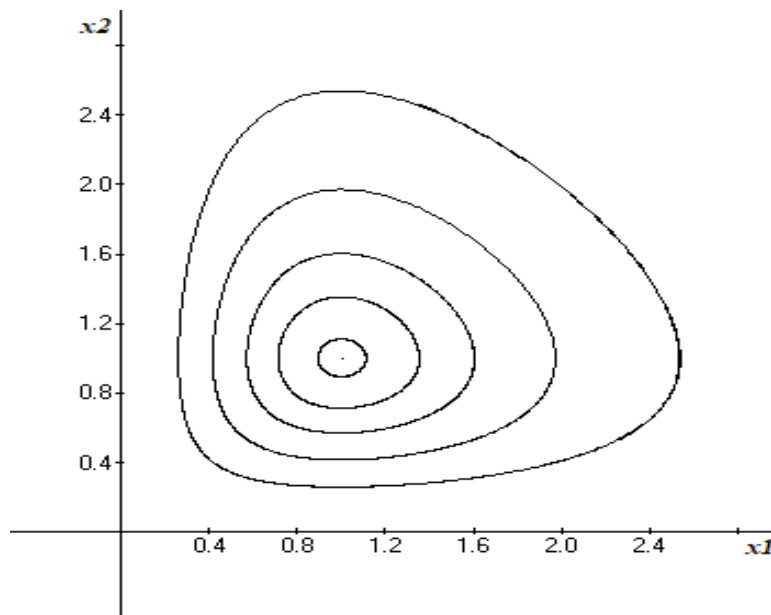


Рис. 4. Интегральные кривые уравнения (11)

Пример 3 (изучение вынужденных движений маятника на фазовой плоскости). Рассмотрим теперь уравнение 2-го порядка (в безразмерном виде), описывающее колебания маятника (рис. 5) в вертикальной плоскости в среде без сопротивления в поле постоянного внешнего момента p [22]

$$\ddot{x} + \sin x = p. \quad (12)$$

Здесь \ddot{x} – угловое ускорение, определяемое выражением

$$\ddot{x} = \frac{d^2 x}{dt^2};$$

x – угол отклонения маятника от вертикальной оси (угол считается положительным, если он образуется отклонением маятника против часовой стрелки, отрицательным – если по часовой стрелки), $x = x(t)$, где t – время.

Кроме того, момент (параметр) p в формуле (12) предполагается неотрицательным. Запишем выражение (12) в виде эквивалентной системы

$$\begin{cases} \dot{x} = y, \\ \dot{y} = p - \sin x. \end{cases} \quad (13)$$

В динамических задачах переход от уравнения 2-го порядка к уравнению 1-го порядка, выполненный указанным способом, сопровождается дополнительной терминологией. Плоскость x, y называется *плоскостью состояний* (или *фазовой плоскостью*). Образ решения системы $x = \varphi(t), y = \psi(t), t \in (\alpha, \beta)$ на фазовую плоскость называется *траекторией* системы, таким образом, траектория есть проекция решения из трехмерного пространства x, y, t на плоскость x, y . Ясно, что, если $p \in [0, 1]$, то система (13) будет иметь счетное множество положений равновесия $C_k((-1)^k \arcsin p + \pi k, 0)$, при $p > 1$ – положений равновесия нет.

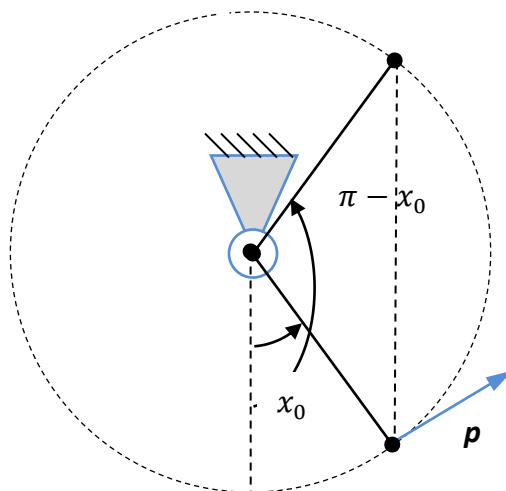


Рис. 5. Схема маятника, где x_0 – устойчивое положение равновесия маятника

Задача, поставленная в настоящем примере, сводится к исследованию расположения траекторий системы (13) на фазовой плоскости x, y в зависимости от внешнего момента p . Этот прием изучения движений на фазовой плоскости часто используется в теории колебаний и является очень распространенным и эффективным.

Разделим теперь второе уравнение системы (13) на первое:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{p - \sin x}{y}. \quad (14)$$

Тем самым мы исключили параметр времени. Это уравнение с разделяющимися переменными. Разделяя переменные и интегрируя, находим общий интеграл

$$\frac{y^2}{2} = px + \cos x + C. \quad (15)$$

Таким образом, задача интегрирования уравнения (14) решена. Однако, что касается второй задачи изучения свойств интегральных кривых, их расположения на плоскости x, y , зависимости от параметра p , то она на порядок сложнее. Как и выше, чтобы изобразить семейство кривых, прибегнем к численному решению. Предварительно систему (13) представим в стандартных обозначениях программы. Тогда

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = p - \sin x_1. \end{cases}$$

В результате моделирования системы (численного счета при разных начальных данных), получаем следующую принципиальную смену картин расположения интегральных кривых в зависимости от возрастания параметра p на плоскости x_1, x_2 (рис. 6).

Таким образом, мы приходим к следующим выводам.

1. Если внешний момент отсутствует ($p = 0$), то маятник либо совершает колебания около нижнего положения равновесия, либо – вращательные (круговые) движения (рис. 6,а). Это зависит от начальной энергии, т. е. от начальных данных x_0, y_0 .

2. Если момент $p > 1$, то маятник совершает вращательные движения и скорость этого вращения постоянно нарастает (рис. 6,з).

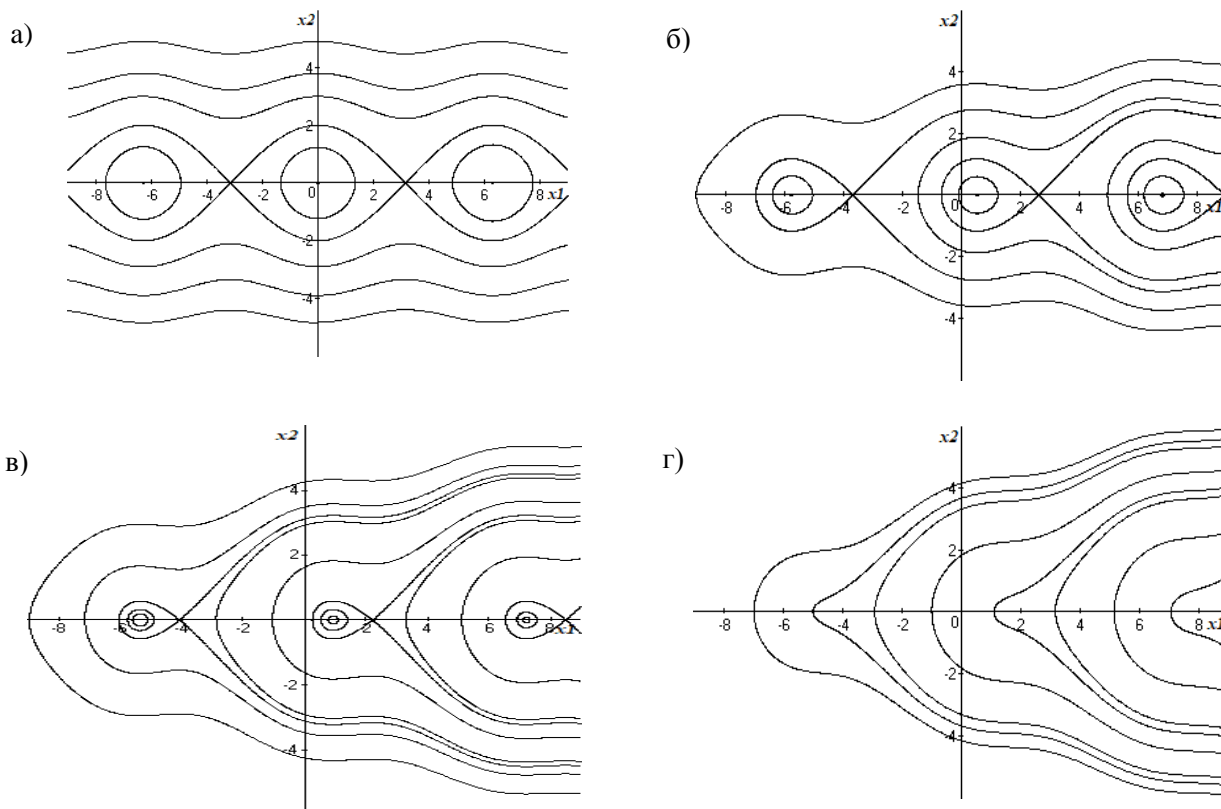


Рис. 6. Семейство фазовых кривых:
а – $p = 0$; б – $p = 0,5$; в – $p = 0,8$; г – $p = 1,2$

3. Если выполняется условие $0 < p < 1$, то маятник может совершать колебания возле устойчивого положения равновесия, которое определяется углом $x_0 = \arcsin p$, измеряемым относительно вертикальной оси, при этом существует неустойчивое положение равновесия маятника $\pi - x_0$ (см. рис. 5). Установление колебательного режима определяется также начальными условиями.

В целом анализ рис. 6 показывает, что с ростом момента p область колебательных движений маятника, уменьшается и при $p > 1$ исчезает, т. е. вне зависимости от начальных данных все движения маятника становятся вращательными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Известно, что многие решения дифференциальных уравнений если и удастся получить в виде некоторой формулы, например общего решения или общего интеграла, то выявить свойства полученной функции крайне затруднительно. Часто эта последняя задача становится сложнее, чем первая (интегрирование уравнения). В таких случаях смысл полученной

формулы теряется и надо прибегать к приближенным методам интегрирования: качественным, асимптотическим, численным.

В курсе дифференциальных уравнений втузов, а также реальных прикладных задачах таких примеров встречается немало. В настоящей статье предлагается использовать программу *WinSet* как дополнительный инструмент исследования свойств решений дифференциальных уравнений. Такой подход, основанный на синтезе аналитического и численного решений, соответствует духу времени и, кроме того, формирует исследовательские навыки у обучающихся.

Список используемых источников

1. *Никольский С. М.* Курс математического анализа. – М. : Наука, 1983. – 464 с.
2. *Петровский И. Г.* Лекции по обыкновенным дифференциальным уравнениям. – М. : Наука, 1970. – 300 с.
3. *Треногин В. А.* Обыкновенные дифференциальные уравнения. – М. : Физматлит, 2009. – 312 с.
4. *Федорюк М. В.* Обыкновенные дифференциальные уравнения. – М. : Наука, 1985. – 448 с.
5. *Понтрягин Л. С.* Обыкновенные дифференциальные уравнения. – М. : Наука, 1974. – 312 с.
6. *Матвеев Н. М.* Методы интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений. – Минск : Вышэйшая школа, 1974. – 300 с.
7. *Ильяшенко Ю. С., Яковенко С. Ю.* Аналитическая теория дифференциальных уравнений. – М. : МЦНМО, 2013. – Т.1. – 432 с.
8. *Пуанкаре А.* О кривых, определяемых дифференциальными уравнениями. – М. : Книга по требованию, 2013. – 386 с.
9. *Немыцкий В. В., Степанов В. В.* Качественная теория дифференциальных уравнений. – М. : ЛЕНАНД, 2017. – 552 с.
10. *Лефшец С.* Геометрическая теория дифференциальных уравнений. – М.: УРСС, 2009. – 384 с.
11. *Ляпунов А. М.* Общая задача об устойчивости движения. – М. : Книга по требованию, 2014. – 388 с.
12. *Демидович Б. П.* Лекции по математической теории устойчивости. – М. : Наука, 1967. – 472 с.
13. *Боголюбов Н. Н., Митропольский Ю. А.* Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. – М. : Физматгиз, 1958. – 418 с.
14. *Вазов В.* Асимптотические разложения решений обыкновенных дифференциальных уравнений. – М. : Мир, 1968. – 462 с.
15. *Коллатц Л.* Численные методы дифференциальных уравнений. – М. : Иностранная литература, 1953. – 460 с.
16. *Годунов С. К., Рябенький В. С.* Разностные схемы. – М. : Наука, 1979. – 436 с.
17. *Морозов А. Д., Драгунов Т. Н.* Визуализация и анализ инвариантных множеств динамических систем. – М.-Ижевск : Ин-т компьютерных исследований, 2003. – 304 с.
18. *Морозов А. В.* Качественная теория дифференциальных уравнений – основная составляющая теории динамических систем // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2014. – Вып. 642. – С. 177–184.
19. *Булекбаев Д. А., Морозов А. В.* Формирование и развитие навыков вычислительного эксперимента у обучающихся на примере исследования динамической системы // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2017. – Вып. 659. – С. 202–209.

20. *Плисс В. А.* Интегральные множества периодических систем. – М. : Наука, 1977. – 304 с.
21. *Вольтерра В.* Математическая теория борьбы за существование. – М.-Ижевск : Ин-т компьютерных исследований, 2004. – 288 с.
22. *Морозов А. В.* Нахождение частных решений солитонного типа дифференциальных уравнений второго порядка // Современные наукоемкие технологии. – 2021. – № 2. – С. 187–193.

В.С. Гончаревский,
доктор технических наук, профессор

ЛЕНИНГРАДСКАЯ КРАСНОЗНАМЕННАЯ ВОЕННО-ВОЗДУШНАЯ ИНЖЕНЕРНАЯ АКАДЕМИЯ И ОСОБЕННОСТИ ОБУЧЕНИЯ В НЕЙ В КОНЦЕ 40-Х И В НАЧАЛЕ 50-Х ГОДОВ XX ВЕКА

Триста десять лет тому назад 16 декабря 1712 года указом императора Петра I было создано первое в России политехническое учебное заведение – Военная инженерная школа, которая явилась предтечей современной Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. Более чем за трехвековой период своего существования многократно изменялось название этого учебного заведения, неоднократно претерпевал изменение профиль подготовки выпускников, но неизменным признаком, неотъемлемым атрибутом учебного заведения оставалось высокое качество его воспитанников. Это достигалось тем, что данное учебное заведение всегда обладало и обладает в настоящее время высококвалифицированным профессорско-преподавательским составом, а его руководство и командование постоянно проводили и проводят сегодня эффективную работу по развитию и совершенствованию учебно-воспитательного процесса. В статье анализируются некоторые особенности организации этого процесса в период, когда академия была Военно-воздушной и готовила специалистов для отечественных Военно-воздушных сил. Кроме того, приводится краткая информация об уникальном учебном подразделении академии того периода – так называемом Сводном курсе, который, несмотря на сравнительно непродолжительный срок своего функционирования, внес весьма существенный вклад в дело подготовки высококвалифицированных военных специалистов.

Ключевые слова: академия, факультет, сводный курс, факультетский курс, учебный процесс.

В конце 40-х и в начале 50-х годов XX века современная Военно-космическая орденов Жукова и Красного Знамени академия имени Александра Фёдоровича Можайского имела название Ленинградская Краснознаменная Военно-Воздушная инженерная академия (ЛКВВИА). Она входила в состав Военно-Воздушных сил (ВВС) Советской Армии и Военно-Морского Флота и готовила для них высококвалифицированные инженерные кадры.

Начальником ЛКВВИА был активный участник Великой Отечественной войны (ВОВ) генерал-лейтенант инженерно-технической службы (ИТС) Родимов Пётр Васильевич (впоследствии – генерал-полковник, профессор), назначенный на эту должность 27 января 1947 года. Его заместителем по общим вопросам был генерал-лейтенант ИТС В. И. Орехов (1950–1953) – участник ВОВ и войны в Испании, а заместителем по учебной и научной работе с 1946 по 1953 год был инженер-полковник В. И. Сифоров (доктор технических наук, профессор, известный ученый в области радиоприемных устройств, впоследствии – член-корреспондент АН СССР, генерал-майор ИТС).

Академия располагалась на Петроградской стороне, в зданиях, занимавших несколько кварталов вдоль улиц: Ждановской, Красного Курсанта (бывшей Большой Спасской) и Пионерской (бывшей Большой Гребецкой), между проспектом Щорса (сейчас Малый проспект Петроградской стороны) и улицей Новоладожской. Некоторые дома представляли архитектурную и историческую ценность, поэтому охранялись государством. Например, это здания бывшего Второго кадетского корпуса (ул. Ждановская, дом 13 и ул. Красного Курсанта, дом 16), архитектор Ф. И. Демерцов. Они были построены в 1796–1803 годах. Здание Павловского военного училища (ул. Красного Курсанта, дом 21, архитекторы Штауберт и Зражевский) было построено в 1837 году, здание Дворянского полка (ул. Красного Курсанта, дом 18, архитектор Луиджи Руска) – в 1820 году, здание манежа Второго кадетского корпуса (ул. Красного Курсанта, дом 16, архитектор Кузнецов) – в 1811 году.

Академия в то время имела сложную многофункциональную и развитую инфраструктуру, которая позволяла командованию и профессорско-преподавательскому составу организовать эффективный учебно-воспитательный процесс в непростых условиях послевоенного време-

ни. В ее состав кроме учебных подразделений входили: авиационный полк, который базировался на аэродроме в г. Гатчине (на нем слушатели проходили летно-технические практики); бывший Комендантский аэродром, на нем стояли списанные самолеты, на которых слушатели проходили эксплуатационные практики; батальон охраны, в обязанности которого входило кроме несения караульной службы обеспечение контрольно-пропускного режима на многочисленных КПП академии; медицинская поликлиника с аптекой и лазаретом; научно-техническая и художественная библиотеки с читальными залами; строевой, финансовый, научно-исследовательский, редакционно-издательский отделы; типография; секретный отдел с библиотекой секретной литературы; отдел кадров; отдел материально-технического снабжения; квартирно-эксплуатационный отдел (КЭО); дома для проживания постоянного состава и дома для офицерских общежитий слушателей; лагеря для прохождения начальной военной подготовки и войсковых практик в районе станций Ляйпейсуо и Можайской; пионерский лагерь, детский сад, ясли и др.

Академия обладала плавучей учебной базой, которая располагалась на Петровском острове вдоль реки Ждановки. На базе проходили практику слушатели, которые готовились для авиации Военно-морского флота (они носили морскую форму одежды, а остальные – авиационную форму). Она имела летний и зимний легкоатлетические стадионы (зимний стадион, который вошел в строй в 1952 году, был вторым по величине после городского Зимнего стадиона); стрелковый тир; клуб с актовым и танцевальными залами и классами для занятий хоровой и инструментальной музыкой; военный духовой оркестр; учебно-опытный завод (УОЗ); столовые для офицерского и рядового состава; многочисленные буфеты; парикмахерские; ателье для пошива воинской формы одежды и др.

В состав академии входили семь учебных подразделений: учебный отдел, которому подчинялись все общеакадемические кафедры (кафедры высшей математики, физики, химии, начертательной геометрии, теоретической механики, иностранных языков, основ марксизма-ленинизма, тактики ВВС и др.); четыре факультета со сроком обучения 5 лет 8 месяцев: инженерный (порядковый номер 1), электротехнический (порядковый номер 2), аэродромостроительный (порядковый номер 3) и радиотехнический (порядковый номер 4), которым подчинялись соответствующие специальные кафедры и шесть курсов офицеров-слушателей. Курс делился на классные отделения слушателей, которые были аналогами современных учебных групп курсантов. Каждый факультет имел свое управление и свою учебную часть.

Академия готовила военных инженеров, эксплуатирующих авиационную технику, стоящую на вооружении ВВС. При этом 1-й факультет выпускал инженеров-механиков (специалистов по конструкции самолетов и двигателей), 2-й факультет – инженеров-электриков (специалистов по авиационному электротехническому оборудованию), 3-й факультет – инженеров-строителей (специалистов по созданию наземной авиационной инфраструктуры по сооружению аэродромов и др.), а 4-й факультет – инженеров-радиостов (специалистов по авиационному радиотехническому оборудованию). В августе 1956 года к академии был присоединен военный гидрометеорологический факультет Советской Армии, который получил порядковый номер 5 и готовил военных инженеров для метеорологического обеспечения ВВС.

Кроме факультетов и учебного отдела в состав академии входили еще два особых учебных подразделения: Подготовительный курс и Сводный курс. Подготовительный курс со сроком обучения в один год был предназначен для подготовки к поступлению на основной 6-летний курс обучения в академии офицеров со средним образованием, которые в силу тех или иных объективных причин не могли сразу успешно сдать конкурсные вступительные экзамены на основной курс академии. В частности, к ним относились участники войны, которые за военные годы утратили в значительной степени знания по общеобразовательным дисциплинам, преподаваемым в средней школе. Закончив отлично подготовительный курс, эти офицеры затем могли поступить без сдачи вступительных экзаменов на основной курс обучения, т. е. для них общий срок обучения в академии составлял 7 лет.

Особенным, отличным от всех, было подразделение ЛКВВИА, которое называлось Сводным курсом. Он был образован в 1948 году, когда было принято решение принимать в академию кроме военнослужащих еще выпускников суворовских училищ, спецшкол ВВС и гражданских средних школ. В результате реализации этого решения состав обучаемых в академии разделился на два контингента:

1) слушатели, которые поступили в академию, уже будучи военнослужащими и имея офицерские или сержантские и старшинские звания;

2) слушатели, которые до поступления в академию воинскую службу не проходили.

Первый контингент был основным и составлял большинство. На первом курсе набора 1951 года на инженерном факультете (факультете конструкций самолетов и авиадвигателей) слушателей из второго контингента вообще не было, а на других факультетах они составляли примерно одну треть. Условия жизни, службы и учебы слушателей первого и второго контингентов были различны. Обучаемые первого из них жили в общежитии или в городских квартирах, а обучаемые второго контингента находились на казарменном положении со всеми вытекающими отсюда последствиями. Обучаемым второго контингента присваивалось воинское звание «рядовой», а должность у них была «слушатель», должность «курсант» в то время в академии отсутствовала.

Слушатели, которые до поступления в академию не служили в войсках, были выделены из состава всех факультетов и объединены в одно подразделение, которое получило название Сводный курс. Они входили в состав этого подразделения либо до получения ими первичных офицерских званий, либо до окончания второго курса, если до этого момента первичное офицерское звание не было присвоено. Общенаучная и общеинженерная подготовка слушателей (первого и второго контингентов) была одинаковой, а вот военная подготовка, естественно, больше у слушателей второго контингента. У последних появился еще один большой стимул для успешной учебы: те из них, кто учился на «хорошо» и «отлично» и не имел замечаний по воинской дисциплине, после окончания первого курса могли быть представлены к присвоению первичного офицерского звания «младший техник-лейтенант».

В тот период офицерские звания для инженерно-технического состава ВВС были следующие:

– для военнослужащих со средним образованием: младший техник-лейтенант, техник – лейтенант, старший техник-лейтенант, капитан технической службы, майор технической службы и т. д.;

– для военнослужащих с высшим образованием: инженер – лейтенант, старший инженер – лейтенант, инженер-капитан, инженер-майор и т. д.

Присвоение первичного офицерского звания приводило к существенным изменениям в условиях жизни и учебы такого слушателя, так как его снимали с казарменного положения.

Сводный курс организационно состоял из командования и отдельных подразделений, которые назывались факультетскими курсами. Командование включало начальника Сводного курса, его заместителей по политической и воспитательной работе, по строевой подготовке, службе войск, а также начальников факультетских курсов. Каждый факультетский курс включал в себя классные отделения слушателей-рядовых первого и второго года обучения соответствующего факультета. Так как в те годы набора рядовых на 1-й факультет не было, то Сводный курс состоял из трех факультетских курсов, которые имели порядковую нумерацию: 1, 2, 3. При этом 1-й факультетский курс состоял из классных отделений слушателей-рядовых радиотехнического факультета, 2-й факультетский курс – из классных отделений слушателей-рядовых факультета электроспецоборудования, а 3-й факультетский курс – из классных отделений слушателей-рядовых аэродромно-строительного факультета. Надо отметить, что командование Академии уделяло особое внимание подбору командования Сводного курса. Туда старались назначать опытных офицеров-воспитателей. Так начальником 1-го факультетского, а затем и Сводного курса был инженер-полковник Калинин Валентин Васи-

льевич, которого очень уважали слушатели-рядовые, он пользовался среди них большим авторитетом.

Практически вся жизнь слушателей-рядовых в учебные дни на протяжении трех семестров обучения на Сводном курсе проходила в ограниченном пространстве дома 21 по улице Красного Курсанта. Там располагались казарма, аудитории для занятий и самоподготовки, общетехнические кафедры, медицинская служба, техническая и художественная библиотеки академии, буфеты для желающих получить дополнительное питание за наличные деньги. Во дворе дома находились спортплощадки, гимнастический городок, плац для строевых занятий и построений. Единственным востребованным заведением за пределами этого дома была столовая в доме 16 по улице Красного Курсанта, куда слушателей-рядовых водили строем. Выйти из дома 21 через контрольно-пропускной пункт (КПП) можно было только по удостоверению слушателя, которое выдавалось ему вместо увольнительной записки при уходе в увольнение или в других экстренных случаях. За пределами дома 21 проходили учебные занятия только по физической подготовке на стадионе СКА или в спортзале.

Схема размещения помещений в доме 21 была примерно следующая. Четыре этажа правого крыла дома занимали общетехнические кафедры (кафедры высшей математики, физики, химии, начертательной геометрии, теоретической механики и др.), аудитории для занятий и самоподготовки. На первом этаже фронтальной части находились редакционно-издательский отдел с типографией, гардероб, парикмахерская, киоски Союзпечати и военторга, кафедры аэродромно-строительного факультета. На втором этаже этой части – медицинская служба, учебные аудитории и кафедры общественных наук [кафедры основ марксизма-ленинизма (ОМЛ), иностранного языка, тактики и др.]. На третьем этаже фронтальной части – офицерское общежитие, художественная библиотека, кафедры общественных наук, учебные аудитории, рабочая комната для марксистско-ленинской подготовки (МЛП). На четвертом этаже: казармы Сводного курса и кафедры аэродромно-строительного факультета. Первый этаж левого крыла дома занимал редакционно-издательский отдел с типографией. На втором этаже находилась техническая библиотека и ее читальные залы, а на третьем и четвертом этажах – кафедры аэродромно-строительного факультета.

У обучавшихся на Сводном курсе должность была слушатель, а воинское звание – рядовой. Должность «слушатель» была офицерской, должности «курсант» в то время в академии не было, т. е. воинскую службу на Сводном курсе обучающиеся проходили на офицерской должности. На первом курсе должностной оклад слушателя был 750 рублей, на втором – 850 рублей, на третьем – 950 рублей, и дальше он оставался таким до выпуска из академии. Так как обучавшиеся находились на офицерской должности, то и бесплатным питанием по курсантской норме они не обеспечивались. Питались они в офицерской столовой, расположенной в доме 16 по улице Красного Курсанта, в отдельном зале по программе под названием «рацион». Из должностного оклада каждый месяц вычиталась определенная сумма денег (около 500 рублей), и выдавались на этот месяц талоны на питание – завтрак, обед и ужин. В столовой по таким талонам выдавалась пища, всем одинаковые блюда: системы заказов не было.

Минимальное время пребывания на Сводном курсе составляло первые три семестра обучения. Если слушатель оканчивал первый курс на «хорошо» и «отлично» и не имел дисциплинарных взысканий, то в конце третьего семестра ему присваивалось первичное офицерское звание «младший техник-лейтенант» и он переводился для дальнейшего обучения на свой факультет. В противном случае он оставался на Сводном курсе и жил в казарме.

Сводный курс функционировал в академии с конца 40-х до конца 50-х годов XX века. (Последний набор на Сводный курс был в 1954 году.) Однако даже за этот сравнительно непродолжительный период он сыграл существенную положительную роль в деле подготовки высококвалифицированных специалистов для наших Вооруженных Сил. Особенно большой вклад Сводный курс внес в повышение качества подготовки этих специалистов, а его деятельность способствовала омоложению их состава. Эти специалисты прекрасно проявили

себя в дальнейшем, служа в войсках. Кроме того, хотелось бы отметить, что именно в значительной степени благодаря выпускникам, которые учились на Сводном курсе и служили затем в академии, ей удалось в 60–80 годы достичь выдающихся результатов в разработке и освоении новой перспективной ракетно-космической техники. Анализ состава адъюнктуры академии периода 60–70 годов показывает, что адъюнктура состояла, главным образом, из таких выпускников, а следовательно, профессорско-преподавательский и научно-исследовательский составы академии обновлялся и пополнялся именно за счет этих молодых талантливых, прекрасно подготовленных и инициативных ученых.

Для подтверждения сказанного приведу только один пример. Из 20 выпускников классного отделения (учебной группы), в которой обучался и автор, прошедших через Сводный курс и окончивших академию в 1957 году, половина окончила адъюнктуру академии в 60-е годы. Двое из них стали докторами технических наук, заслуженными деятелями науки и техники РФ, остальные восемь – кандидатами технических наук, доцентами и старшими научными сотрудниками. Представляется, что одной из причин этого являлся тот факт, что слушателям-рядовым Сводного курса, окончившим первый курс на «хорошо» и «отлично» и не имевшим дисциплинарных взысканий, присваивалось первичное офицерское звание «младший техник-лейтенант». Чтобы получить его, они очень старались глубоко и качественно изучать и усваивать содержание тех учебных дисциплин, которые читались на первом курсе. А ведь это были базовые для специалиста и инженера дисциплины, такие как высшая математика, физика, теоретическая механика и др. Их отличное знание было необходимым условием дальнейшего качественного изучения специальных учебных дисциплин.

Надо сказать, что обучение на Сводном курсе давало и другие навыки и знания, важные для военного человека. Это хорошая строевая, стрелковая, физическая подготовка, знание воинских уставов Вооруженных Сил и иных военных предметов. Кроме того, что очень важно, здесь формировалось чувство воинского коллектива, способность к товарищеской помощи и взаимовыручке и др. Помимо занятий в академии эти навыки прививались во время лагерных сборов, которые проводились в течение одного-полутора месяцев до 1951 года в строевых авиационных частях, а затем в загородных лагерях, принадлежавших академии. Первый сбор проводился перед началом обучения на первом курсе. Его целью была начальная военная подготовка, после которой слушатели принимали воинскую присягу. Второй сбор проводился после окончания первого курса. Основная работа по проведению лагерных сборов возлагалась на кафедры оперативно-тактической и физической подготовки.

Необходимо добавить, что одним из главных инициаторов создания Сводного курса в академии был ее начальник генерал-лейтенант ИТС Родимов Пётр Васильевич. Это было еще одним проявлением и показателем его огромного таланта как прекрасного руководителя и воспитателя крупных воинских коллективов.

Отметим некоторые особенности учебного процесса в академии того времени на примере радиотехнического факультета, на котором тогда обучался автор. Начальником факультета в конце 40-х годов был инженер-полковник В. Г. Карпов, один из основоположников радиотехнических дисциплин в академии. В 1952 году его сменил известный ученый в области радиопередающих устройств доктор технических наук, профессор Дробов Серафим Алексеевич (впоследствии заместитель начальника академии по учебной и научной работе, генерал-лейтенант ИТС). В состав факультета в то время входили десять кафедр: кафедра 40 («Основы авиационной радиотехники»); 41 («Спецрадиотехника», затем – «Радиолокации»); 42 («Радиосамолетовождение», затем – «Радионавигация»); 43 («Авиационная радиосвязь»); 44 («Радиопередающие устройства»); 45 («Антенно-фидерные устройства»), 46 («Авиационные радиоприемные устройства»); 47 («Радиотелемеханика», затем – «Системы радиоуправления»); 48 («Электровакуумные электронные приборы и импульсная техника»); 49 («Организация и боевое применение авиационных радиосредств»).

Обучение проводилось по одной единой для всех слушателей факультета специальности – эксплуатационной по радиотехническим средствам ВВС с присвоением квалификации «ин-

женер по радиотехнике ВВС». Положительной стороной такого широкого профиля подготовки являлось то, что выпускник факультета быстро входил в строй и прекрасно справлялся со своими функциональными обязанностями независимо оттого, в какую воинскую часть он попадал и какое радиооборудование ему надо было там обслуживать – бортовое или наземное, радиолокационное или радионавигационное, радиосвязное или аппаратуру систем радиоуправления. Так как слушатели обучались по одной специальности, лекции по всем учебным дисциплинам читались в составе потоков, а практические занятия проводились по учебным группам (тогда они назывались классными отделениями). Так, на курсе набора 1951 года было два потока. Один поток состоял из трех офицерских групп, а второй поток – из двух групп слушателей-рядовых и одной группы из офицеров и старшин, а также сержантов сверхсрочной службы.

Срок обучения в академии составлял пять лет и восемь месяцев, т. е. было шесть курсов обучения. На шестом курсе осуществлялись эксплуатационная практика и дипломное проектирование.

В академии сформировалась хорошо продуманная и апробированная система войсковых стажировок и производственных практик. Последовательность войсковых стажировок соответствовала иерархии должностей инженерно-технического состава в типовой воинской части ВВС, каковым являлся авиационный полк:

– первая стажировка после первого курса обучения – в должности механика группы технического обслуживания радиооборудования эскадрильи. В полку должность занимали солдаты срочной службы, окончившие школу младших авиационных специалистов (ШМАС) со сроком обучения один год;

– вторая стажировка после второго курса – в должности начальника группы технического обслуживания радиооборудования эскадрильи или начальника группы регламентных работ радиооборудования технико-эксплуатационной части (ТЭЧ) полка. Эти должности в полку занимали офицеры со средним специальным техническим образованием после окончания авиационно-технических училищ со сроком обучения 2-3 года;

– третья стажировка после пятого курса обучения в академии – в типовой должности инженера по радиооборудованию авиационного полка. Такие должности должны были занимать офицеры с высшим специальным техническим образованием, т. е. выпускники академии. В отличие от предыдущих стажировок, на которые слушатели обычно выезжали в воинские части в составе классных отделений (учебных групп), эта стажировка проходила в индивидуальном порядке: каждый слушатель выезжал в свою воинскую часть один (в истребительном авиационном полку была только одна должность инженера по радиооборудованию).

Последовательность производственных практик также соответствовала иерархии, только иерархии профессий и должностей на промышленных предприятиях.

Первая практика проводилась после второго курса обучения в академии на учебно-опытном заводе (УОЗ) академии по слесарному делу и работе на станках и соответствовала работе на должности рабочего общего профиля (токаря или слесаря),

Вторая практика выполнялась после третьего курса и была посвящена изучению производства деталей (сопротивлений, конденсаторов, электровакуумных приборов и др.) различных радиоустройств и соответствовала работе на должности рабочего со специальной радиотехнической подготовкой [после окончания специального производственно-технического училища (ПТУ)]. Проводилась эта практика на промышленных предприятиях и в научно-исследовательских организациях г. Ленинграда.

Третья практика проводилась после четвертого курса. Она была посвящена изучению производства различных радиоустройств (радиопередатчиков, радиоприемников и т. д.), входящих в состав различных радиотехнических систем, и соответствовала работе на должности техника со специальной радиотехнической подготовкой (после окончания радиотехни-

кума). Слушатели проходили ее на предприятиях промышленности г. Ленинграда и других крупных городов СССР.

После пятого курса обучения перед дипломным проектированием было три практики. Одна из них была посвящена изучению производства конкретной радиотехнической системы военного назначения, что соответствовало должности, которую должен был занимать радиоинженер (после окончания академии). Вторая практика была летно-технической. В ходе этой практики изучались применение и эксплуатация авиационных радиотехнических систем в воздухе. Слушатели выполняли различные задания во время полетов на специально оборудованных самолетах типа ЛИ-2, которые играли роль учебных лабораторий и входили в состав учебного авиационного полка (УАП) академии, который базировался на аэродроме в г. Гатчине. Третья практика называлась эксплуатационной. В процессе ее изучались обслуживание и ремонт авиационных радиотехнических систем на земле, проведение технических осмотров и регламентных работ на этой технике. Она проводилась в Ленинграде на Комендантском аэродроме, который в тогда принадлежал академии. На нем находились списанные самолеты (истребители МИГ-15, бомбардировщики ТУ-16, ТУ-4, ИЛ-28), которые были полностью оборудованы соответствующей радиотехнической аппаратурой.

После завершения эксплуатационной практики начиналось дипломное проектирование. Его тематика была тесно связана с тематикой научно-исследовательских работ кафедр, факультета и академии. Такие работы выполнялись в содружестве с другими ведущими научно-исследовательскими организациями и воинскими частями. Так как большое внимание уделялось проведению экспериментальных исследований, одной из особенностей проектирования было то, что часть из этих исследований нередко выполнялась не в стенах академии, а в указанных организациях. Причем эти организации могли находиться за пределами Ленинграда, например в Москве или в других населенных пунктах. Это касалось прежде всего дипломных проектов, в которых осуществлялись экспериментальные исследования с созданием действующих макетов и экспонатов разработанных устройств.

Обучение в академии завершалось защитой дипломных проектов, в процессе которой практиковалась демонстрация работы созданных макетов и экспонатов, если таковые были разработаны в проекте. Какие-либо выпускные экзамены отсутствовали. Данное обстоятельство позволяло слушателю уделить больше времени и внимания исследованиям в рамках темы его дипломного проекта, что являлось также одной из особенностей организации учебного процесса в ЛКВВИА в тот период.

Список используемых источников

1. Военный инженерный Краснознаменный институт имени А. Ф. Можайского: очерк истории 1941–1981 гг. / под общ. ред. генерал-полковника А. И. Холопова. – Л. : ВИКИ им. А. Ф. Можайского, 1981. – 304 с.
2. Военный инженерный Краснознаменный институт имени А. Ф. Можайского: очерк истории 1941–1991 гг. – Л. : ВИКИ им. А. Ф. Можайского, 1990. – 394 с.
3. Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского : История научно-исследовательской и конструкторской деятельности / автор проекта и руководитель авторского коллектива Ю. А. Никулин. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2020. – 316 с.
4. Исторический очерк факультета радиоэлектроники Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2011. – 239 с.

Н. С. Кужекин,
кандидат философских наук, профессор;
В. В. Мышко,
кандидат технических наук, доцент;
В. А. Чикуров,
кандидат технических наук, доцент

ПРОБЛЕМЫ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ ОБУЧЕНИЯ КУРСАНТОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЗАНЯТИЙ ПО ВОЕННО-СПЕЦИАЛЬНЫМ ДИСЦИПЛИНАМ

В статье рассматриваются основные проблемы, которые возникают в процессе ведения образовательной деятельности при проведении занятий с курсантами по военно-специальным дисциплинам. Предлагаются некоторые способы их решения путем выбора технологий обучения.

Ключевые слова: военно-специальная дисциплина, технологии обучения, оптимизация технологии обучения.

При выборе технологий обучения реализация образовательного процесса в вузе имеет определенные подходы [1, 2], как общие в рамках федерального государственного образовательного стандарта (ФГОС), так и устанавливающие в рамках квалификационных требований к военно-профессиональной подготовке выпускников (КТ).

Решение задачи оптимизации образовательного процесса в условиях поиска правильного пути построения образовательной системы является актуальной и довольно широко обсуждается научной общественностью. Однако в различных работах [3–7, 8] не рассматривается оптимизация технологии обучения по основным профессиональным образовательным программам высшего образования. При изучении отдельных (особенно военно-специальных) дисциплин возникает прямая зависимость качества формирования профессиональных компетенций от проведения различных видов учебных занятий, которая, по мнению авторов, раскрыта недостаточно. Следует учесть, что на выбор технологий обучения влияют уровень образования, требования руководящих документов, опыт педагогического состава и ряд других факторов.

Необходимость рассмотрения существующих проблем оптимизации технологии обучения при проведении занятий с курсантами вузов Министерства обороны России по военно-специальным дисциплинам продиктована в первую очередь их значительным вкладом. Такие дисциплины по объему учебного плана составляют около 30% всего бюджета времени и направлены на формирование профессиональных компетенций, необходимых для выполнения выпускниками должностных обязанностей, что на практике наиболее важно.

Проведение занятий с курсантами по военно-специальным дисциплинам сопряжено с проблемной ситуацией, которая, с одной стороны, состоит в необходимости проведения занятий с учетом требований ФГОС и КТ, а с другой стороны, – с наличием значимых факторов, которые влияют на методику преподавания в процессе достижения общих целей образования [2].

Разрешение проблемной ситуации состоит в выборе соответствующих технологий обучения (рис. 1.).

В настоящее время каждая основная профессиональная образовательная программа (ОПОП) предполагает разработку отдельных элементов, среди которых ведущее значение имеет учебный план. Структура учебного плана по любой специальности предусматривает наличие обязательной части и части, формируемой участниками образовательных отношений. Военно-специальные дисциплины относятся ко второй части и направлены, преимуще-

ственно, на формирование компетенций, установленных квалификационными требованиями относительно общих целей ведения образовательной деятельности в вузе по подготовке специалиста. В зависимости от требований подготовки специалиста формирование компетенций возможно при наличии соответствующих учебных дисциплин, которые могут полностью или частично входить в программы различных специализаций в рамках специальности.

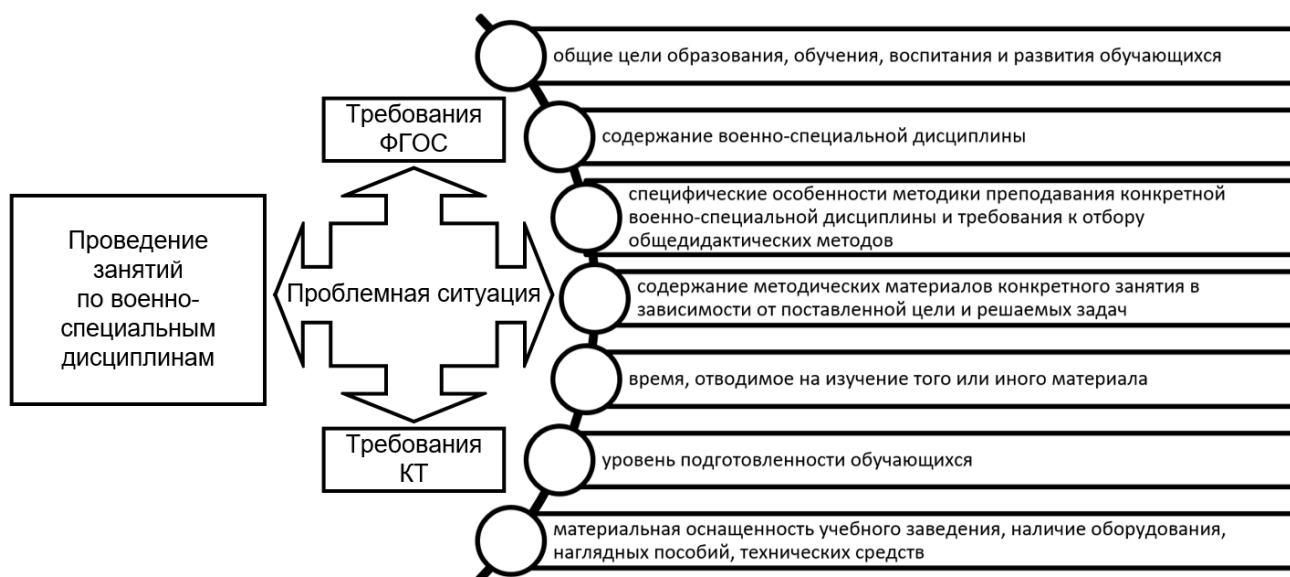


Рис. 1. Факторы, влияющие на выбор технологий обучения

Проведение сравнительного анализа различных специализаций, относящихся к одной специальности, позволяет сформировать такой состав учебных дисциплин, который удовлетворяет направлению подготовки, что влияет на выбор последующей технологии обучения.

При разработке учебного плана учитывается структурно-логическая последовательность изучения дисциплин.

Состав и последовательность изучения учебных дисциплин являются основным инструментом оптимизации методики преподавания и, как следствие, технологии обучения в целом. При этом возникает, с одной стороны, необходимость изучения общих для всех специализаций дисциплин, что обеспечивается выделением бюджета времени на изучение общих дисциплин, по которым возможно проведение занятий в потоке. С другой стороны, – необходимость контакта обучающихся с профильной кафедрой. Стоит отметить, что выделение бюджета на изучение специальных дисциплин может оказаться затруднительным. В этом случае не всегда есть возможность обеспечить контакт выпускающей кафедры с обучающимися по профильной специализации во всех семестрах, что в целом может оказать негативное влияние на процесс обучения, воспитания и развития обучающихся. Одним из выходов из данной ситуации, по мнению авторов, является использование возможности привлечения обучающихся к работе в военно-научном обществе.

Целесообразно при отсутствии возможности изучения дисциплин по профилю выпускающей кафедры в отдельных семестрах применить технологию доведения учебного материала таким образом, чтобы знание основ предстоящей подготовки по военно-специальным дисциплинам позволило, с учетом привлечения обучающихся к работе в военно-научном обществе, обеспечить непрерывность формирования компетенций и, соответственно, достижение планируемых результатов освоения основной профессиональной образовательной программы.

Как правило, учебные планы подготовки по любой специальности предполагают изучение на первом курсе дисциплин профессионального цикла, а в последующем рациональное рас-

положение учебных дисциплин, раскрывающих специализацию подготовки. При этом особенностью содержания любой военно-специальной дисциплины является необходимость последовательного совершенствования подготовки курсантов, что позволит расширить их кругозор и постепенно вовлечь наиболее способных в научную деятельность по основным направлениям работы кафедры, в том числе и перспективным. Знание будущими выпускниками кафедры своего предназначения поможет сформировать устойчивые знания, навыки и умения, которые потребуются для прохождения службы на офицерских должностях.

На выбор технологий обучения влияет также особенность методики преподавания военно-специальных дисциплин.

С точки зрения формирования «знаний», «умений» и «навыков» выбор технологий обучения существенно отличается. Так, при формировании знаний преимущественно используется доведение основных теоретических положений в ходе лекционных занятий. В то же время, в процессе обучения курсантов по военно-специальным дисциплинам, существенный акцент делается на развитии навыков и умений, а следовательно, и выбор технологий обучения должен быть в пользу проведения практических занятий.

Нужно учитывать тот факт, что «обучение» – это определение учебной деятельности, т. е. процесса, в то время как «образование» – это результат такой деятельности. Нам в первую очередь важен именно результат, специалист владеющий широким спектром знаний, умеющий эксплуатировать вооружение и военную технику в различных условиях обстановки, как можно быстрее приступить к исполнению своих должностных обязанностей. Именно поэтому разрабатываются профессиональные стандарты. Но невозможно получить высокий результат, если нет достаточно четкого понимания того, как организовать процесс подготовки специалиста и как оценить оптимальность выбранных технологий обучения курсантов, которые реализуются при проведении занятий по военно-специальным дисциплинам. Повышению качества подготовки военных специалистов вузом способствует ежегодное проведение анализа отзывов на каждого выпускника, в которых на основании определенных критериев и показателей оценивается уровень сформированности компетенций.

Для разработки элементов основных образовательных программ используются методические указания, которые учитывают особенности, отражающие основные тенденции в подходах к обучению. Так, в последние два десятилетия основной упор делался на удовлетворение требованиям «болонской системы». Однако для подготовки военного специалиста «универсальность» подготовки необходима и должна предполагать способность освоения смежных специализаций за короткое время, в то время как «болонская система» во главу угла ставила способность к «ротации» и возможность последующего признания за рубежом. Но, как показала практика, мы так и оставались «чужими» и наши специалисты приравнивались к бакалаврам. Что же касается военного специалиста, то последнее (имеется в виду признание за рубежом) не только излишне, но и невозможно ввиду специфики деятельности. Новый взгляд на систему образования должен учесть все хорошее и не допускать ошибок при выборе технологий обучения курсантов.

Выбор технологии обучения курсантов при проведении занятий по военно-специальным дисциплинам влияет на формирования содержания методических материалов.

Традиционно процесс обучения предусматривает организационные, контрольные и управляющие (стимулирующие) методы. При этом методы контроля за эффективностью учебно-познавательной деятельности могут быть как устные, так и письменные. Как правило, освоение той или иной компетенции предполагает наличие индикаторов достижения и показателей оценивания знаний, умений, навыков, что позволяет свести в единое целое перечень планируемых результатов обучения, как по образовательной программе в целом, так и по дисциплине в частности, с планируемыми результатами освоения образовательной программы.

При разработке рабочих программ (РП) по военно-специальным дисциплинам существенным моментом является определение индикаторов достижения компетенций. Здесь следует

определить показатели оценивания, сформировать контрольные задания, выбрать оптимальные формы текущего контроля и промежуточной аттестации.

По военно-специальным дисциплинам проверка (самопроверка) результативности овладения знаниями, умениями и навыками предусматривает проведение практических действий, которые нельзя просто записать на бумаге.

У преподавателя может быть свой «список» технологий обучения, например:

- 1) показ-демонстрация (технология пассивного обучения);
- 2) «делай как я» (технология интерактивного обучения);
- 3) выполнение вводной, иначе говоря, «делай как я сказал (написал)» (технология активного обучения).

Нужно отметить, что с развитием компьютерных технологий показ-демонстрация все чаще используется как при проведении лекций, так и при демонстрации работы приборов, элементов техники или специальных средств. При этом стоит учесть тот факт, что при проведении занятий со слайдами (мультимедийными презентациями) от преподавателя требуются особые умения и навыки как в технологии разработки, так и в технологии дальнейшего использования демонстрационных материалов, так как они не должны отвлекать обучающихся от ведения конспекта, а призваны способствовать наглядному раскрытию проблемных вопросов. Однако именно относительная пассивность при таком обучении часто имеет обратный эффект: неслучайно, чем красочнее лекция представлена на слайдах, тем меньше записей может остаться в конспектах.

Занятие с использованием показа-демонстрации не должно быть легким или скучным, а показ должен способствовать уяснению учебного материала при проведении занятий по военно-специальным дисциплинам. Например, показ развития нештатных ситуаций при функционировании автоматизированных комплексов обработки информации или демонстрация функционирования элементов вооружения и военной техники, которую невозможно разместить в лаборатории.

Еще одной проблемой, по мнению авторов, является подготовка презентаций, которые предполагают использование всего выделенного времени на изучение материала. В таком случае занятие приобретает форму линейного доведения учебного материала, не предполагающее отклонение в какую-либо сторону, что не всегда позволяет обеспечить сбалансированность распределения времени, отводимого на проведение части занятий прикладной направленности.

Использование технологии обучения курсантов по принципу «делай как я» лучше подходит при проведении занятий практической направленности. Отчетность может быть выбрана преподавателем либо в виде сравнения получаемых решений с имеющимися, либо в публичной защите результатов, либо в других формах, которые можно зафиксировать как результат.

Технологии обучения курсантов, которые предполагают выполнение вводных (решение общих или индивидуальных заданий), – это технологии активного обучения. Здесь нельзя не отметить известное правило, которое можно описать так: «Учиться можно на чужих ошибках, но на своих – запоминается лучше».

С учетом комплекса названных обстоятельств и условий преподаватель принимает в той или иной последовательности ряд решений: о выборе словесных, наглядных или практических методов, репродуктивных или поисковых методов управления самостоятельной работой, методов контроля и самоконтроля. Так, в зависимости от дидактической цели, когда на передний план выдвигается задача приобретения курсантами новых знаний, преподаватель решает вопрос, будет ли он в данном случае сам излагать эти знания; организует ли он их приобретение обучающимися путем организации самостоятельной работы и т.п. В первом случае может понадобиться подготовка обучающихся к слушанию изложения преподавателя, и тогда он дает курсантам задание либо на проведение определенной самостоятельной подготовки, либо на предварительное прочтение необходимого материала.

Если предварительно была проведена целевая самостоятельная подготовка, то при проведении занятий по военно-специальным дисциплинам в ходе самого изложения преподаватель может воспользоваться информационным изложением-сообщением или проблемным изложением. При этом, излагая новый материал, преподаватель может систематически обращаться к раздаточному материалу, который курсанты получили ранее в ходе предварительной самостоятельной подготовки или непосредственно в ходе занятия.

Таким образом, используется технология обучения курсантов, в ходе которой изложение учебного материала преподавателем проводится с учетом уровня подготовленности обучающихся. Дополнительно преподаватель может использовать демонстрацию натуральных объектов, их изображений, опытов, экспериментов и т. п. Обучающиеся при этом делают соответствующие записи или пометки на графиках, схемах или иных раздаточных материалах, которые находят отражение в конспектах. Совокупность этих промежуточных решений и составляет одно целостное решение о выборе определенного сочетания методов обучения.

В настоящее время уделяется много внимания тому, как правильно преподнести учебный материал, т. е. при использовании технологий пассивного обучения значительное время преподаватель тратит на разработку методических материалов: поиск, обобщение, разработку новых необходимых средств раскрытия учебного материала, создание презентаций, а при необходимости и видеоряда (например, мультимедийной лекции). Эффективность выбора такой технологии обучения курсантов может быть опосредованно оценена при контроле ведения конспекта, проведении летучек или в ходе промежуточной аттестации.

Опыт проведения учебных занятий показывает, что для достижения целей формирования профессиональных компетенций важным элементом учебного процесса является правильное распределение времени на проведение различных видов учебных занятий [9].

Показ-демонстрация в ходе лекционных занятий может быть реализован с использованием специализированных аудиторий с комплектом мультимедийного оборудования для проведения лекционных и групповых занятий. Для проведения занятий практической направленности зачастую нужны учебно-тренировочные комплексы или тренажеры, которых иногда не хватает. Поэтому по результатам проведения государственных итоговых аттестаций, в качестве недостатков отмечаются такие, как отсутствие эксплуатационно-технической документация в объеме, достаточном для подготовки специалистов. Кроме того, предлагается проведение работы по совершенствованию учебно-материальной базы, оснащению вуза специальными информационно-аналитическими, программно-аппаратными комплексами и комплексами средств автоматизации, образцами вооружения и военной техники, стоящими на вооружении в войсках.

По мнению авторов, решение данной проблемы возможно путем установления тесного взаимодействия кафедры с заказчиком подготовки по вопросам поставки образцов штатного или перспективного вооружения, а также самостоятельной разработки учебно-тренировочных средств, реализующих элементы технологии применения и эксплуатации вооружения и военной техники.

Стоит отметить, что на выбор технологий обучения оказывает влияние уровень профессиональной подготовки профессорско-преподавательского состава, который обеспечивается прохождением переподготовки и повышением квалификации, в том числе в войсках, где профессорско-преподавательский состав изучает особенности разработки методических материалов, новые методические приемы проведения учебных занятий, знакомится с современными методиками преподавания и условиями их применения.

Некорректное использование технологий обучения курсантов профессорско-преподавательским составом при проведении занятий по военно-специальным дисциплинам приводит к поверхностному изложению учебного материала. В этом случае отдельные курсанты демонстрируют слабые знания в работе с документами, низкий уровень штабной культуры при отработке графических и текстовых документов и слабые навыки формирования предложений в решение командира по видам обеспечения и вопросам приведения подразделений

в высшие степени боевой готовности. Отдельные выпускники могут показать низкие навыки в проведении эксплуатационной работы при решении ситуационных специальных задач.

Так как выбор технологий обучения зависит от общих целей образования, обучения, воспитания и развития обучающихся, то это напрямую связано с соответствием назначения выпускника на должность после окончания военного вуза по специальности подготовки в академии. Вместе с тем сокращается время на допуск к самостоятельной работе, и, как следствие, появляется возможность для командира воинской части сделать положительный вывод о соответствии выпускника занимаемой должности, а может, и о целесообразности назначения на вышестоящую должность.

Следует отметить, что перечень рассмотренных факторов не претендует на завершенность работы в этом направлении и может изменяться в зависимости от возникающей проблемной ситуации. Так, например, использование результатов анализа служебной деятельности выпускников в войсках позволяет перестроить технологию обучения по военно-специальным дисциплинам для получения оптимальных результатов формирования социально-психологических качеств, военно-профессиональной, общевойсковой, общепрофессиональной и общенаучной подготовленности.

Список используемых источников

1. Об образовании в Российской Федерации: федеральный закон от 29 декабря 2012 года № 273-ФЗ : с изм. и доп. [вступил в силу 01 января 2022 года]. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_140174 (дата обращения: 14.03.2023).
2. Об организации образовательной деятельности в федеральных государственных организациях, осуществляющих образовательную деятельность и находящихся в ведении Министерства обороны Российской Федерации : приказ Министра обороны Российской Федерации № 308 от 30 мая 2022 года [регистрационный номер 69138]. – Мин-во юстиции РФ, 2022. – 72 с.
3. Военная педагогика : учебник для вузов / под ред. О. Ю. Ефремова. – СПб. : Питер, 2008. – 640 с.
4. Педагогические технологии : учеб. пособие / М. В. Буланова-Топоркова [и др.]. – Ростов н/Д: издательский центр «МарТ»; Феникс, 2010. – 336 с.
5. *Корепанова М. В., Гончарова О. В.* Основы педагогического мастерства : учебник. – М. : издательский центр «Академия», 2012. – 240 с.
6. *Панфилова А. П.* Инновационные педагогические технологии: Активное обучение : учеб. пособие для студентов учреждений высш. проф. образования. – 2-е изд., стер. – М. : издательский центр «Академия», 2011. – 192 с.
7. Современные образовательные технологии: учеб. пособие / под ред. Н. В. Бордовской. – М. : КНОРУС, 2011. – 432 с.
8. Технологии профессионально-ориентированного обучения: учеб. пособие / М. А. Голубев [и др.]; под ред. Н. С. Кужекина. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2019. – 136 с.
9. *Кужекин Н. С., Мышко В. В., Чикуров В. А.* Модель обоснования планирования объема учебной работы педагогических работников образовательных организаций Министерства обороны Российской Федерации // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2021. – Вып. 677. – С. 247–253.

Л. А. Иноземцева;
Н. С. Кужекин,
кандидат философских наук, профессор

ДИНАМИКА СИСТЕМЫ ПОЗНАВАТЕЛЬНОЙ МОТИВАЦИИ В ПРОЦЕССЕ СТАНОВЛЕНИЯ ПРЕПОДАВАТЕЛЯ ВОЕННО-УЧЕБНОГО ЗАВЕДЕНИЯ

В публикации рассматриваются актуальные проблемы развития познавательной мотивации как одного из ключевых компонентов в процессе профессионального становления преподавательского состава военно-учебного заведения. Предлагается модель развития системы познавательной мотивации в ходе профессиональной переподготовки и повышения квалификации педагогических работников.

Ключевые слова: познавательная мотивация, мотивация профессиональной деятельности, динамика познавательной мотивации, профессиональное совершенствование, профессиональная переподготовка, повышение квалификации.

На сегодняшний день в качестве серьезных задач системы военного образования выступают установка преподавателей военных вузов на формирование профессиональной компетентности и непрерывное самосовершенствование как существенный фактор их продуктивной педагогической деятельности. В результате появляются требования к подготовке педагогических работников с надежно сформированной системой потребностей и мотивов профессионального самообразования и способностей к полноценному самовыражению в профессиональной деятельности.

Современные реалии требуют от специалистов самостоятельности и «творческой», чувствительности к новшествам, признания и внедрения в жизнь инноваций, готовности к реализации собственной индивидуальности. Профессиональное становление преподавателя, наделенного подобными качествами, характеризуется сложностью, динамичностью, длительностью освоения необходимых профессиональных составляющих. Оно начинается с появлением первых представлений о педагогической профессии и не заканчивается пробными шагами в практической деятельности, а подразумевает многогранный процесс синтеза и реализации целого комплекса как профессиональных, так и личностно значимых качеств, мотивов и способностей, направленности преподавателей на непрерывное профессиональное саморазвитие. Отсюда столь значима и в теоретическом, и в практическом аспектах динамика системы познавательной мотивации в процессе становления преподавателя военно-учебного заведения.

Исследование динамики системы познавательной мотивации педагогических работников позволит существенно повысить качество разрабатываемых и постоянно обновляющихся дополнительных программ повышения квалификации. Мотивация преподавателя военно-учебного заведения к непрерывному профессиональному самосовершенствованию является основополагающей составляющей его профессиональной компетентности, поскольку именно мотивы стимулируют личностную активность и запускают процесс формирования требуемых спецификой педагогической деятельности качеств и компетенций.

Поиск внутренних условий роста профессионализма преподавателя актуализирует проблему мотивации его профессионально-педагогической деятельности, определяющую уровень профессионализма педагогических работников и, соответственно, педагогической деятельности в целом.

Важность формирования в образовательном процессе прежде всего именно познавательной мотивации субъектов педагогической деятельности – как необходимого критерия гармо-

ничного, целостного развития личности – неоднократно была отмечена в психолого-педагогической литературе [1, 6].

Раскрывая термин «мотивация», ученые-педагоги в первую очередь определяют учебные и профессиональные мотивы как эффективный способ управления мотивацией профессионального совершенствования преподавателя [3–5].

Г. И. Щукина отмечает, что, изучая природу познавательного мотива, обнаруживая его наиболее существенные грани, удастся конкретизировать его ценность для учебно-воспитательного процесса в следующем качестве:

– как активный учебный инструмент, познавательный мотив стимулирует образовательный процесс, активизирует наиболее существенные компоненты знаний; содействует успешному применению умений и навыков в учебной деятельности;

– как мотив учения, он создает предпосылки для формирования ориентации обучающегося на выполнение требований преподавателя, столь необходимой для эффективного решения учебных задач;

– как устойчивое психическое свойство, он стимулирует развитие творческой, самостоятельной и активной личности [7].

Мотивация профессионально-педагогической деятельности преподавателя военно-учебного заведения рассматривается авторами как сложноорганизованная система внутренних побуждений, таких как смысложизненные ориентации, профессиональные интересы, ценности и смыслы, личная потребность быть компетентным.

Существенное значение имеет развитие познавательных мотивов и познавательных потенций личности как основы плодотворной деятельности и готовности к самообразованию в системе профессиональной подготовки и повышения квалификации. Познавательные мотивы, будучи смыслообразующими мотивами, определяют интерес к содержанию и процессу профессиональной подготовки. Как наиболее действенные, продуктивные мотивы учения, они интенсифицируют поиск и закрепление знаний, оказывающих непосредственное воздействие на психическое развитие личности и ее познавательного потенциала. Поэтому при организации процесса профессиональной подготовки так важно актуализировать познавательные мотивы в структуре мотивации педагогических работников.

Познавательные мотивы, включенные в практическую деятельность, непосредственно участвуют в образовании системы многогранных отношений личности: **выбранного** предпочтения предметной области, видов познавательной деятельности; форм взаимоотношений с субъектами образовательного процесса.

Важно, чтобы преподаватель добивался удовлетворения наиболее глубинных познавательных потребностей и интересов, потребности в личностном саморазвитии и самоактуализации. Ему следует быть не объектом воспитывающих воздействий начальников и коллег, а субъектом собственной деятельности, занимать активную позицию в выявлении ее мотивов, формулировании ее целей и задач.

Появляясь как ситуативное явление в деятельности, познавательная мотивация совершает продолжительный путь своего развития, становясь в завершение устойчивым личностным образованием будущего преподавателя. В динамике системы познавательной мотивации выделяется несколько этапов:

– слабо дифференцированное побуждение к новым психолого-педагогическим знаниям;

– личностный поиск и анализ материала, проявляющийся в обнаружении интересов к педагогической деятельности;

– целенаправленная познавательная деятельность, выражающаяся в постоянном стремлении к знаниям в конкретной предметной области дисциплин профильной кафедры;

– становление склонности к определенному виду деятельности, профессиональное призвание в процессе профессионального становления.

Интенсивность познавательной мотивации преподавателей кафедр обуславливается уровнем их взаимной психологической поддержки в процессе профессиональной подготовки и

повышения квалификации, использованием современных частных методик преподавания с элементами инновационных технологий, проектированием индивидуальной траектории профессионального развития.

Практика преподавания в высшей военной школе показывает, что условием значительного успеха в развитии познавательных мотивов преподавателя является грамотно выстроенная система планирования и постановки образовательных, творческих, научных задач. Ориентация на выполнение таких задач не является устойчивой характеристикой – интерес трансформируется на протяжении всего профессионально-педагогического пути и обуславливается не только пополнением багажа знаний, формированием педагогических навыков, но и спецификой учебных дисциплин, практикой их преподавания, квалификацией профессорско-преподавательского состава и индивидуально-психологическим своеобразием личности [2].

Неповторимость и подвижность системы познавательной мотивации требует необходимости учета обнаруженных мотивов педагогического совершенствования и построения индивидуального маршрута профессиональной деятельности в системе дополнительного профессионального образования. С этой точки зрения целесообразно поставить вопрос о сроках профессионального становления преподавателя военно-учебного заведения. Нам представляется, что этот период включает время от момента получения права на ведение образовательной деятельности в сфере педагогики высшей военной школы до завершения обучения по программе повышения квалификации в группе педагогических работников.

Исследование динамики системы познавательной мотивации педагогических работников в ходе освоения программ профессиональной переподготовки и повышения квалификации позволило авторам сформулировать особенности становления преподавателя академии. Этот процесс характеризуется следующим:

– *преимуществом рабочих программ дисциплин.* Например, в процессе профессиональной переподготовки военных специалистов изучаются учебные дисциплины «Педагогическая психология», «Психология и педагогика высшей военной школы», «Электронные образовательные и информационные ресурсы». В ходе освоения программы повышения квалификации, с учетом анализа недостатков и достижений полученного предыдущего опыта обучения, педагогические работники изучают дисциплины «Актуальные психолого-педагогические проблемы образовательной деятельности в высшей военной школе», «Современные технологии обучения и тенденции развития предметной области», позволяющие совершенствовать конкретные компетенции, углублять имеющиеся знания, навыки и умения;

– *непрерывностью профессионального становления* с момента овладения преподавателем необходимым объемом знаний в процессе профессиональной переподготовки вплоть до повышения квалификации в системе дополнительного профессионального образования;

– *дифференцированностью обучения*, что обеспечивается такой организацией учебной деятельности, которая учитывает индивидуальные различия слушателей: возрастной состав аудитории, опыт педагогической деятельности, преобладающие интересы, уровень профессиональной подготовленности и т. д.;

– *кооперацией субъектов образовательного процесса*, подразумевающей эффективное сотрудничество преподавателей кафедр и слушателей и в конечном итоге направленной на повышение качества системы подготовки преподавателей;

– *оптимизацией обучения*, ориентированной на планомерное и систематическое совершенствование системы подготовки педагогических работников.

В процессе подготовки педагогических работников академии целесообразно обеспечивать педагогический процесс необходимым ресурсом для преобразования познавательных мотивов в устойчивую профессиональную мотивацию и ориентацию преподавателя на непрерывное образование и дальнейшее профессиональное самосовершенствование.

Модель развития системы познавательной мотивации в процессе профессиональной переподготовки и повышения квалификации педагогических работников должна включать следующие элементы.

1. Четкая характеристика перечня психолого-педагогических компетенций, формирующихся в результате освоения образовательной программы или подлежащих совершенствованию.

В процессе профессиональной переподготовки у слушателей формируются базовые компетенции педагогической деятельности. В процессе педагогической практики начинающие преподаватели адаптируются к условиям и специфике профессиональной деятельности, осознают правильность выбора профессии, приобретают навыки педагогического сотрудничества, формируют профессиональные паттерны поведения, а также педагогическое самосознание и профессиональные компетенции.

Повышение квалификации направлено на обновление, расширение, совершенствование профессиональных компетенций посредством реализации соответствующих программ согласно постоянно меняющимся требованиям и условиям педагогической деятельности.

2. Выбор оптимального соотношения между теоретической и практической подготовкой педагогических работников в учебном плане дополнительных профессиональных программ. Диапазон профессиональных задач, решаемых профессорско-преподавательским составом, требует сформированности практических навыков и комплексных компетенций, в связи с чем объем теоретической и практической подготовки в рамках профессионального цикла, по данным, полученным авторами в ходе их исследований, может варьироваться от 50 до 80% и предполагает выполнение преподавателями задач в условиях, максимально приближенных к профессиональным.

3. В целях формирования познавательной мотивации у слушателей основной упор необходимо сделать на предметную область дисциплин – отбор учебной информации проводить с опорой на потребности реальной педагогической практики и актуализировать его необходимость для образовательного процесса. Целесообразно применять комплексный подход при проектировании содержания учебных дисциплин, например: изучение раннее рассмотренного материала под новым углом зрения, актуализация новых аспектов предмета изучения с учетом межпредметных связей и профессиональной направленности.

4. Одним из элементов развития познавательной мотивации является использование в процессе обучения слушателей группы повышения квалификации педагогических работников современных образовательных технологий, активных и интерактивных форм проведения занятий. Целесообразно шире применять на учебных занятиях проблемные методы изучения дисциплин (проблемные лекции, исследовательскую деятельность), интерактивные методы обучения (дискуссии, коллоквиумы, научно-практические конференции, мастер-классы, тренинги, деловые игры, кейс-методы), которые стимулируют активизацию учебного процесса, познавательной деятельности обучающихся; максимальное приближение образовательной деятельности к профессиональной.

5. Необходимо создать условия для персонифицированного развития преподавателей. Личностно-ориентированные технологии обучения позволяют выявить индивидуальный опыт и творческую неповторимость педагогических работников. Грамотная организация образовательного процесса обуславливает самоопределение обучающихся в отношении содержания индивидуальной программы обучения и выстраивания траектории его продвижения к намеченной цели. Кроме того, обучение по индивидуальному плану способствует проектированию временной последовательности учебного процесса, отбору способов, форм и средств построения успешного субъект-субъектного взаимодействия участников образовательного процесса.

В качестве одного из существенных показателей динамики сформированности познавательной мотивации можно выделить индивидуальные задания, выполненные слушателями. Критерием продуктивного разрешения задач при их выполнении является нестандартность,

ценность и оригинальность представленных результатов. Опыт применения на учебных занятиях перечисленных способов стимулирования убедительно показывает, что они усиливают познавательную мотивацию педагогических работников как на занятиях, так и вне образовательного процесса, тем самым способствуя формированию устойчивого интереса к педагогической профессии.

6. Немаловажным фактором познавательной мотивации является взаимодействие профессорско-преподавательского состава кафедры с преподавателями академии, организованное путем установления плодотворного, всестороннего сотрудничества. Такая совместная деятельность побуждает педагогических работников без страха и сомнений, по-новому, творчески решать поставленные практические задачи, исследовать новые, нетривиальные пути достижения высоких учебных результатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, динамика формирования системы познавательной мотивации и профессиональной направленности преподавателей военно-учебных заведений базируется на личностно-ориентированных технологиях обучения и реализуется посредством создания педагогических условий, нацеленных на актуализацию личностного потенциала обучающихся, разработку индивидуально-ориентированных программ обучения для каждого слушателя. Такой подход в обучении слушателей способствует осмыслению ими личной потребности в самосовершенствовании, ценности усвоения навыков передовых способов осуществления педагогической деятельности; стимулированию «творческой» и в целом – мотивированию к достижению вершин профессиональной компетентности.

Список используемых источников

1. *Иноземцева Л. А.* Педагогическая психология: учеб. пособие. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2018. – 116 с.
2. *Иноземцева Л. А., Кужекин Н. С.* Психолого-педагогические императивы формирования профессиональной компетентности преподавателя военно-учебного заведения // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2020. – Вып. 675. – С. 388–393.
3. *Красношлыкова О. Г.* Мотивация профессионального роста педагогов в современных условиях // Профессиональное развитие в России и за рубежом. – 2016. – № 2 (22). – С. 47–54.
4. *Кузьмина Н. В., Жаринов Н. М., Жаринова Е. Н.* Акмеологические технологии высшего образования. – СПб. : Изд-во НУ «Центр стратегических исследований», 2016. – 410 с.
5. *Митина Л. М.* Профессионально-личностное развитие педагога: диагностика, технологии, программы : учеб. пособие для вузов. – М. : Юрайт, 2020. – 430 с.
6. Психология и педагогика высшей военной школы / Н. А. Репях [и др.] : учеб. пособие. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2016. – 248 с.
7. *Щукина Г. И.* Проблема познавательного интереса в педагогике. – М. : Педагогика, 1971. – 351 с.

Е. О. Науменкова,
кандидат исторических наук

РОЛЬ БРИТАНСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ МАШИНЫ В РАЗЖИГАНИИ РУСОФОБИИ КАК СРЕДСТВА ИНФОРМАЦИОННОЙ БОРЬБЫ С РОССИЕЙ ВО ВРЕМЯ РУССКО-ТУРЕЦКОЙ ВОЙНЫ 1877–1878 ГОДОВ

В статье рассматривается описание британскими периодическими изданиями разной направленности (консервативными, либеральными, католическими) событий Русско-турецкой войны 1877–1878 годов. В результате изучения материалов британской прессы можно сделать вывод, что в указанный период почти вся она была настроена антирусски, а консервативные газеты, в том числе и католические, открыто придерживались русофобских и протурецких взглядов. На примерах публикаций в прессе показан процесс формирования антирусского общественного мнения, которое во многом складывалось под влиянием статей, где солдаты царской армии изображались убийцами и варварами, истреблявшими мирное население как во время войны с османами, так и во время подавления польского восстания 1863 года. Можно выделить две основные причины антирусских настроений. Первая из них – это стремление Британии сохранить целостность Османской империи как противовеса России на Балканах. Вторая заключается в том, что в случае эскалации конфликта и возможной войны можно будет демонизировать и «обесчеловечивать» образ потенциального противника. Кроме того, в статье рассматриваются отношение прессы к условиям заключения мира между воюющими сторонами, а также отношение изданий различной направленности к возможному вступлению Британии в войну против России.

Ключевые слова: Великобритания, русофобия, Русско-турецкая война (1877–1878), пресса.

Противоборство России с Великобританией является одной из важнейших и актуальнейших тем в современной науке. С начала специальной военной операции России (СВО) русофобия, прочно укоренившаяся в правящих кругах и средствах массовой информации стран Запада, достигла своего апогея. Против России ведется идеологическая война, направленная на изменение сознания населения с целью деморализации армии и общества. Министр обороны РФ С. К. Шойгу справедливо заметил, что информация стала одним из видов вооруженной борьбы. В связи с этим представляется актуальным обратиться к событиям Русско-турецкой войны 1877–1878 годов, когда Российская империя выступила как защитник православных народов Балканского полуострова и противник турецкого гнета, вступив в войну с Турцией.

В 1876 году вспыхнуло восстание в Болгарии. На подавление были отправлены нерегулярные турецкие войска, устроившие резню православного населения. Сначала информации об этом не придавали особого значения. Премьер-министр Великобритании Бенджамин Дизраэли назвал такие сообщения «болтовней в кофейнях» и «сплетнями болгарского консула». Британия была заинтересована в сохранении стабильной Турции как одного из крупнейших рынков для сбыта товаров и противовеса России на Балканах.

Но вскоре вскрылись масштабы трагедии – было убито более 30 000 человек, включая женщин, детей и стариков. Сведения об этом стали быстро распространяться по Старому Свету и вызвали широкую волну протестов европейской общественности, включая Великобританию. В итоге во многом под давлением либеральной прессы («Таймс», «Дейли Ньюс», «Спектайтор», «Манчестер Гардиан» и др.) и общественности, с одной стороны, и вследствие опасения британского правительства последствий Русско-турецкой войны – с другой, консервативный кабинет Дизраэли был вынужден принять участие в решении «восточного кризиса», которое предполагало активное дипломатическое воздействие на Турцию.

Однако, пока представитель Британии маркиз Солсбери пытался урегулировать конфликт путем переговоров, за его спиной посол Элиот старался уверить турков, что Англия примет

участие в войне на их стороне. Поэтому не удивительно, что султан отверг выработанный шестью великими державами план реформ, направленный на защиту православного населения. Британская печать саркастически предложила России найти в данном исходе нравственное вознаграждение и утешиться сознанием своей силы относительно Турции. Об интересах христиан ведущая газета «Таймс» очень кстати умолчала [1]. В ответ Россия выступила на стороне православных угнетаемых народов и объявила Турции войну.

Тон британской прессы мгновенно изменился. Британский гуманизм по отношению к православному населению Османской империи отошел на задний план, уступив место собственным национальным интересам в период российского вторжения на Балканы. Антирусский характер приобрели статьи в прессе различной направленности – консервативной, либеральной, католической. Крупнейшие лондонские издания называли Россию виновницей балканского кризиса, изначально принимавшей активное участие в провоцировании проблем на Балканах. Стала распространяться совершенно абсурдная теория «русского заговора», суть которой заключалась в том, что русские агенты инспирировали восстание в Болгарии и убедили коррумпированных турецких министров не посылать туда регулярные войска. Таким образом, когда началась паника, на месте были только черкесы и башибузуки, устроившие резню мирного населения. Журналист «Стандарта» Альфред Остин утверждал, что кровь каждого убитого болгарина – на руках русских дипломатов [2–4].

Британская пресса активно навязывала общественности мысль о том, что во время Константинопольской конференции именно Петербург сознательно стремился усложнить ситуацию, чтобы использовать отказ Турции от протокола как повод к войне. Российских дипломатов во главе с Игнатьевым обвиняли в недобросовестности, хитрости, изворотливости, жестокости, постоянной привычке лгать, что, якобы, и привело к срыву мирного решения вопроса. Консервативная «Дейли Телеграф» решительно заявляла, что на какие бы условия ни согласилась Турция, Россия с самого начала была настроена на вооруженный конфликт [5–7].

При этом категорический отказ Турции проводить хотя бы ограниченные минимальные реформы для славянских народностей, на чем изначально настаивала Россия, во внимание не принимался. Никаких доказательств участия России в организации восстаний на Балканах и срыве переговоров пресса представить, естественно, не могла. Достаточно было голословных обвинений, чтобы значительная часть британцев поверила в то, во что им так хотелось верить – в коварство «русских варваров». Европейскому обывателю активно навязывалось, что защита православного населения является лицемерным прикрытием, тогда как истинными стремлениями русских являются: как минимум – возвращение Бессарабии, присоединение Армянского нагорья, свободный проход для военных кораблей через Босфор и Дарданеллы и как максимум – создание славянской империи со столицей в Константинополе [8–11]. Таким образом, война, развязанная Россией, является «лицемерной, жалкой и самой несправедливой со времен темных веков», заключила консервативная «Дейли Телеграф» [12–14].

В связи с первоначальными успехами русской армии весной-летом 1877 года панические настроения охватили значительные слои английского общества. «Видите, – кричали в Лондоне, – этот страшный колосс, русский медведь [15] все одолеет, для него нет непреодолимых преград, – спешите его укротить» [16]. Появилась и стала быстро распространяться в политических кругах идея защиты интересов Великобритании.

Крупнейшие издания различной направленности, нагнетая политическую и общественную истерию, утверждали, что враг находится уже у ворот Британии. Под угрозой сугубо английские интересы – безопасность дороги в Индию. Взяв Константинополь, русские через Сирию захватят Египет, установят контроль над Суэцким каналом, а оттуда прямой путь к «жемчужине Британской короны». Кроме того, победы России на Кавказе приведут к падению турецкой власти в Армении и исчезновению барьера между Россией и Индией, а Россия получит стратегически важные позиции, откуда она сможет вмешиваться в жизнь британских колоний. Именно поэтому потенциальный маршрут в Индию через долину Евфрата должен

принадлежать *исключительно* (выделено авт. – *Е. Н.*) Британии, поскольку он предоставит значительные политические и коммерческие преимущества, был убежден либеральный «Экономист» [17, 18].

Анализ британской прессы начала 1877 года показывает, что за дымовой завесой активно растущей русофобии, распространяемой политическим истеблишментом Англии, явно прослеживалось стремление части правящих кругов перейти от политического нейтралитета в российско-турецком конфликте к прямому военному участию в нем против Российской империи. Поэтому не вызывает удивления тот факт, что, продолжая обвинять Россию во всех «тяжких грехах», уже в июне 1877 года Туманный Альбион делает первый шаг к фактическому отказу от соблюдения нейтралитета [19, 20].

В июне 1877 года правительство Дизраэли под мнимым предлогом защиты британских подданных отправило часть средиземноморской эскадры в Безикскую бухту, находящуюся недалеко от пролива Дарданеллы. Либеральная пресса была довольно сдержанна в оценках, тогда как ведущие консервативные издания «Дейли Телеграф», «Стандарт», «Монинг Пост» мгновенно высказались в поддержку Кабинета и были единодушны: данный акт является лишь предосторожностью и защитой британских интересов в ответ на переправу русской армии через Дунай [21, 22]. Постепенно консервативная пресса стала формировать у британцев мнение, что война с Россией неизбежна.

Стремясь демонизировать образ потенциального врага, в парламенте и в СМИ начала муссироваться тема «России – тюрьмы народов». Статьи появлялись в изданиях разной направленности – консервативной, католической, либеральной, местной. Пресса не стеснялась в выражениях! Обычно сдержанные столичные «Экономист» и «Таймс» в этот раз прямо называли царское правительство одним из худших в Европе, поскольку оно, желая улучшить положение славянских народов Османской империи, само является угнетателем «многих подвластных рас» – имелась в виду прежде всего Польша [23, 24].

Ряд изданий публиковали совершенно абсурдные сообщения корреспондентов, уверявших, что царские войска, якобы, кастрировали пойманных польских инсургентов, а также жестоко пытали и вешали польских женщин, включая молодых девушек, только за то, что они носили траур [25, 26]. Ошибки в фактах, статистических данных, ложные выводы, которые были подкреплены заимствованными и многократно опровергнутыми аргументами, – ничто не смущало русофобские издания! «Творимое насилие» в Польше, с одной стороны, выставлялось в противовес турецким зверствам в Болгарии, с другой стороны, создавало у читателей впечатление, что политика Петербурга ничем не отличается от политики Порты.

Сравнивая формирование конституционных институтов и способность стран к демократическому развитию, английские издания были уверены, что распадающаяся Османская империя под благотворным влиянием Британии способна к позитивным изменениям, в отличие от отсталой российской самодержавной монархии. Было выдвинуто даже предположение, что российский истеблишмент усмотрел в создании турецкого парламента личное оскорбление. «Поскольку Россия не хочет быть единственной страной в Европе, оставшейся без конституционных институтов, то не может позволить Порте их иметь», – сделала оригинальный вывод одна из газет [27].

На этом фоне в первые месяцы войны, когда русские войска успешно наступали на Балканах и Кавказе, «синие книги» (сборники документов, представляемые правительством парламенту. – *Е. Н.*) и официозные газеты были полны нелепых слухов о зверствах, чинимых русскими солдатами. Представители прессы, особенно провинциальной, как будто соревновались в придумывании броских шокирующих заголовков: «Зверства русских», «Русские зверства на Кавказе», «Ужасные русские зверства. Деревни сожжены, а жители убиты» [28–33]. На наш взгляд, подобные сообщения объяснялись не только русофобскими настроениями редакторов, но и стремлением привлечь внимание к изданию, увеличить тираж, а следовательно, и прибыль. Важно отметить и тот факт, что поскольку отправить своего корреспондента на фронт могли только самые крупные газеты, сообщения о «жестокостях» рус-

ских провинциальные издания попросту перепечатывали из столичных, прежде всего туркофильской «Дейли Телеграф».

Информация публиковалась на основе донесений корреспондентов якобы лично находящихся на передовой или из «проверенных, высокопоставленных, заслуживающих доверия источников», правда каких именно не говорилось. В лучших традициях информационных войн пресса делала ставку на разрушение гражданской инфраструктуры, осквернение религиозных мест – мечетей, убийство мирного населения, прежде всего беззащитных женщин, детей и стариков [34–36]. Целью публикации подобных сообщений было формирование у читателя мнения, что русские расправы превосходили по своей жестокости действия турок в ходе подавления болгарского восстания 1876 года.

Стремясь подчеркнуть, якобы, низость и бесчеловечность российских солдат и офицеров, русофобские издания утверждали, что войска, отступая, либо добивали своих раненых, либо бросали их на поле боя. Раненых русских, по информации из таких публикаций, турки доставляли в госпиталь, где османские хирурги оказывали им всю необходимую помощь [37].

Однако в реальности свидетельств о подобных случаях гуманного обращения с русскими ранеными и пленными было крайне мало. Гораздо чаще имели место другие эпизоды, которые замалчивались британской прессой. Корреспондент отечественной газеты «Гражданин» с горечью сообщал, что он лично видел обезображенные и изувеченные трупы замученных и добитых раненых: одним перерезали горло, другим нанесли до 10 сабельных ударов, на голове вырезали кресты, на груди – турецкие надписи, с боков вырывали куски мяса, отрезали уши, руки. «Часто попадались тела с сожженными боками, руками и ногами. Их замучили живыми, что видно на лицах, носивших следы страданий» [38]. Для фиксации данных злодеяний приглашались военные представители и корреспонденты иностранных держав. Так, когда генерал Скобелев обнаружил груды изувеченных русских трупов и башню из отрезанных голов, он пригласил корреспондента «Таймс» засвидетельствовать этот случай.

Поскольку доказательств преступлений русских войск не находилось, турки шли на подлог. Заставляли жителей деревень подписывать ложные свидетельства о насилиях, будто бы совершенных русскими. Если жители отказывались подписывать бумаги, то их секли розгами и отнимали имущество. Не гнушались османы и разного рода инсценировками. Так, корреспонденту «Таймс», расследовавшему русские «жестокости», показывали тела болгар, убитых турками, и уверяли, что это турки, убитые казаками [39, 40].

И хотя императорские войска давали крайне мало поводов для обсуждения, тем не менее, поставленная британским правительством и консервативной прессой задача восстановить общественное мнение против России была быстро и успешно решена. Уже в мае-июне по всей Британии наблюдался всплеск антирусских настроений. Английский военный атташе при Александре II Уэлсли сообщал, что публика по отношению к русским настроена крайне враждебно. В крупнейших лондонских театрах зрители требовали, чтобы играли «Боже царя храни» и всякий раз этот гимн освистывали, а затем заставляли играть турецкий гимн и покрывали его аплодисментами [41]. В Гайд-парке регулярно проводились митинги, осуждающие проводимую Россией политику. Причем состав участников был самый разнообразный: рабочие с окраин, члены парламента, представители общественных организаций, лондонские католические ирландские общества, проходившие под знаменами и с оркестрами к месту встречи. Плакаты начинались словами: «Долой Россию!» [42]. Таким образом, буквально все слои британского общества были подвержены антирусским настроениям.

Компрометирующие материалы, подаваемые коммонерам в «синих книгах» или общественности в печати, не подвергались критической оценке в отличие от событий 1876 года в Болгарии. Тогда министры настаивали на необходимости тщательной проверки обвинений против турок, прежде чем признать их основательными, тогда как во время Русско-турецкой войны спешили принять за действительные самые абсурдные сообщения. В 1876 году, когда министру был сделан запрос насчет болгарских убийств, он попросил палаты подождать докладов консулов. Причем отмечалось, что доклады появятся не скоро, поскольку консул

находится вдалеке от упоминаемых мест. В итоге первая синяя книга «о болгарских зверствах» была напечатана после продолжительного объезда Болгарии дипломатом Бэрингом и только после того, как он лично убедился в совершенной резне. В ходе конфликта 1877–1878 годов английскому правительству подобные предосторожности представлялись излишними. Хотя ни один английский консул лично не наблюдал жестокостей, приписываемых царским войскам, а доклады агентов основывались на заявлениях турецких властей или на не заслуживающих доверия свидетельствах, тем не менее английское правительство спешило обнародовать жестокости русских и ни разу не высказалось против голословных обвинений российских воинов [43].

Подобное стремление правительства и консервативной прессы изобразить русских солдат варварами вполне объяснимо. В Кабинете Дизраэли шли серьезные обсуждения возможной войны с Россией и правительству было важно «обесчеловечить» образ противника в глазах нации и получить поддержку народа на проводимый курс в случае эскалации конфликта. Дело не ограничивалось публикацией антироссийских материалов. Косвенно Сент-Джеймский кабинет участвовал в войне на стороне турок. К османам отправляли английских офицеров-инструкторов, инженеров, снабжали армию амуницией, новейшими скорострельными ружьями, заваливали патронами. Британия делала все возможное, чтобы не допустить победы русского оружия!

Как и следовало ожидать, газеты не обошли своим вниманием и описание сражений. Однако далеко не всегда к британским читателям поступала объективная информация. Причины крылись в следующем: с одной стороны, депеши с реальными цифрами о потерях османских войск не пропускались турецкими властями, с другой стороны, британские туркофильские издания сознательно искажали информацию, преуменьшая потери турок, а потери русских, напротив, преувеличивая. Так, по мнению «Дейли Телеграф», турки якобы уже к августу вырезали треть русской армии [44]. Заметим, что откровенной дезинформацией пользовались не только британские газеты, но и крупнейшие немецкие и австрийские издания, писавшие о выдуманных больших сражениях, в ходе которых было убито в два раза больше солдат и офицеров, реально находящихся на фронте [45].

Естественно, подобные сообщения вызывали негодование среди российской общественности. «Гражданин» вопрошает: «Когда же тон иностранных газет и даже депеш перестанет быть относительно России оскорбительным? Ничего даже похожего мы не встречали в той же иностранной печати о Пруссии в 1870–1871 гг. Спрашивается, почему же относительно России дерзает иностранная печать то, чего они не дерзали относительно Пруссии» [46].

Справедливости ради заметим, что серьезные либеральные издания, несмотря на антирусские настроения, предпочитали не спешить с публикацией непроверенных сведений о «русских варварах», поскольку информация о них поступала только из официального турецкого источника. Авторитетная «Таймс» резонно заявляла: «Правительство обвиняет русских в грабежах, убийствах и поджогах, забывая, что подобные обвинения слишком легко возводить, чтобы им можно было верить без доказательств. Прежде чем обвинять, надо бы постараться собрать такие доказательства» [47].

Сотрудник «Дейли Ньюс» прямо советовал не верить телеграммам, посылаемым через турецкие линии, поскольку турки тщательно фильтровали информацию и бесцеремонно перехватывали известия, которые им не нравились, например об устраиваемых грабежах курдов и башибузуков [48, 49].

Корреспондент «Таймс» придумал неординарный способ заставить турецкие власти пересылать его депеши. Так, при необходимости передать важную информацию он прибавлял к своему известию байку о русских жестокостях, и турки, в восхищении, передавали депешу, не обрезая ее, а в редакции газеты знали, что пускать в печать, а что нужно вычеркнуть. Таким образом, мнимые русские жестокости позволяли обходить турецкие ограничения. Тот же корреспондент сообщает, что, когда его депешу о нехватке в турецком лагере медиков и лекарств не пропустили, он добавил к ней сообщение о неслыханном зверстве русского офи-

цера, принадлежащего к знатнейшей русской фамилии, который заказал себе на завтрак рагу из мусульманского ребенка под соусом! На этот раз цель была достигнута, и депеша прошла без возражений. В заключение автор сетует: «На какой детской степени культуры стоят люди, с которыми надобно действовать таким образом, и как тягостно образованному человеку, корреспонденту английской газеты, прибегать к подобным уловкам, чтобы иметь возможность говорить правду и сообщать дельные сведения!» [50].

Критический момент наступил после падения Плевны. В британском правительстве всерьез обсуждался вопрос о войне с Россией. Неистовствовавшая королева Виктория постоянно подстегивала премьер-министра Дизраэли к самым решительным действиям. Последний со свойственным ему авантюризмом взял курс на резкое ужесточение позиции в отношении традиционного геостратегического противника. Чрезвычайный и полномочный российский посол в Британии П. Шувалов охарактеризовал этот злобный антирусский дуэт как «сговор полубезумной женщины» и «политического клоуна». Именно в эти дни появилась столь знаменитая песенка английских шовинистов: «Мы не хотим войны, но, если, волею Джинго, придется воевать, у нас будут корабли, будут люди и будут также деньги». С тех пор термин «джингоизм» вошел в международный лексикон для обозначения крайней националистической агрессивности [51].

Вполне естественно, что вопрос о падении Плевны и предстоящей войне находил живой отклик на страницах прессы. Большинство газет сохраняли здравомыслие, их представители были уверены, что не стоит поддаваться паническим настроениям, поскольку Горчаков – канцлер Российской империи прямо сообщил, что захват столицы не входит в планы России. Поэтому издания надеялись на благоприятный исход кризиса и не призывали опрометчиво ввязываться в войну на континенте, тем более, как рассудительно писала «Таймс», это «предприятие явно не увенчается успехом» [52, 53].

Думается, здравый расчет брал верх над авантюрными планами. Серьезные издания как консервативной, так и либеральной направленности откровенно признавали, что Британия не располагала достаточными военными силами. Небольшой десант находился на кораблях в Безикской бухте. На Мальте находились менее 10 000 солдат и офицеров. Понятно, что для ведения военных действий и, следовательно, формирования отряда из 60 000 человек потребуются значительное время и финансовые средства, которые тяжелым бременем лягут на плечи налогоплательщиков. Все это, естественно, вызовет недовольство в обществе. Авторы статей с досадой признавали, что втягиваться в войну с Россией не захочет ни одна из великих держав. «Австрия и Германия будут руководствоваться своими собственными интересами. У Франции нет мотива ссориться с Россией, а Италия будет только рада уменьшению нашего влияния в Средиземном море», – констатировал «Экономист» [54, 55]. Поэтому пресса настойчиво призывала английское правительство сохранять нейтралитет и приложить все усилия для примирения враждующих сторон. Исключение составляла католическая пресса, уверявшая читателей, что Британия находится в наилучшей форме и полностью готова к войне [56].

Авторитетные издания открыто предупреждали Турцию: ни одна европейская страна не встанет на ее сторону. С продолжением военных действий, продвигаясь по территории, Россия будет находить новых союзников среди христианских подданных Порты. Кроме того, автономное княжество Сербия готово начать войну, Греция разработала план аннексии некоторых территорий. Так, еще несколько месяцев и Турция в лучшем случае рискует потерять полдюжины провинций, в худшем – произойдет полный распад Османской империи, предостерегала «Таймс». Даже обычно воинственные газеты в этот раз рекомендовали туркам не упрямыться, а отдаться на милость победителя и принять необходимые меры для улучшения положения христианских народов империи. Газеты цинично признавали, что заключение мира и сохранение Османской империи интересуют Британию лишь как гарантия безопасности их собственных интересов. «Дейли Телеграф» беззастенчиво писала: «Мы не должны

жертвовать нашими интересами или ставить их под угрозу из-за упрямства турецких министров» [57–59].

Обсуждая условия будущего мира, пресса надеялась, что Россия не будет строга к побежденному и не станет выдвигать слишком большие требования. «В любом случае, – безапелляционно заявила «Дейли Телеграф», – России не стоит предаваться праздным мечтаниям относительно создания независимого Болгарского государства по обе стороны Балканского хребта, получения территорий в Закавказье и главное – установления контроля над проливами Босфор и Дарданеллы». Издание предостерегало читателей, что свобода проливов даст России возможность контролировать Константинополь с моря, а наличие флота в Средиземном море станет постоянной угрозой Египту. «Не без причины наши отцы воспользовались своим правом завоевания и закрыли узкий пролив. Британцы горько пожалеют о том дне, когда их сыновья откажутся от своего права», «Если же министры допустят хотя бы обсуждение российских требований, то правительство Дерби-Биконсфилда будет ввергнуто в такую пропасть, из которой им никогда не выбраться», – грозило издание [60].

Таким образом, пресса пыталась убедить англичан быть благоразумнее и не спешить втягиваться в войну с сомнительным итогом, а отстаивать свои позиции дипломатическим путем, тем более что другие ведущие европейские державы также не желали усиления России. В этих условиях становилось ясно, что на предстоящей конференции Британия сделает все возможное, чтобы лишить Россию плодов ее победы.

В целом, подводя итоги, отметим, что с начала конфликта британская пресса заняла осторожную позицию и делала ставку на дипломатическое решение проблемы. Однако, когда вопрос не разрешился и Россия вступила в войну с Турцией, настроения прессы кардинально изменились. Издания всех направлений выступили в защиту британских интересов на Востоке, прежде всего в Индии. С развитием военных успехов русских войск росла антироссийская пропаганда. Пресса, ставшая признанной «четвертой силой», отражала, с одной стороны, общественное мнение Британии, с другой – формировала его, освещая события с определенного ракурса. Устойчивой темой публикаций для консервативной и католической прессы стали антирусские и туркофильские статьи, изображавшие солдат царской армии убийцами и варварами, истреблявшими мирное население. Общественному мнению предлагались готовые оценки, истины без предъявления доказательств. Регулярно использовались фальсификация и подмена фактов. Такие провокации стали благодатной почвой для демонизации образа России и расчеловечивания ее населения.

В заключение представляется уместным процитировать русскую газету «Сын Отечества», давшую очень емкую характеристику Русско-турецкой войне 1877–1878 годов, которая не утратила свою актуальность и в современных реалиях: «Можно сказать, что мы ведем теперь не одну, а две и даже целых три войны зараз: первую с Турцией, вторую с ее друзьями, поставляющими ей против нас оружие, людей и деньги, и третью с теми из ее друзей, которые обыкновенное оружие заменяют клеветой, всячески стараясь вооружить против нас общественное мнение Европы» [61].

Список используемых источников

1. Гражданин : газ. – 1877. – № 23, янв.
2. Daily Telegraph. – 1877. – July, № 9; August, № 17.
3. The Economist. – 1877. – April, № 14. – P. 415.
4. Standard. – 1876. – July, № 10.
5. Daily Telegraph. – 1877. – May, № 2, 7; July, № 9; August, № 17.
6. The Economist. – 1877. – April, № 14. – P. 415;
7. Pall Mall Gazette. – 1877. – May, № 7.
8. Daily Telegraph. – 1877. – May, № 2, 7; June, № 7.

9. Pall Mall Gazette. – 1877. – May, № 23.
10. Wyatt W. J. The Eastern Question from an English Point of View. – L., 1876. – P. 4;
11. Гражданин : газ. – 1877. – Окт, № 31.
12. Daily Telegraph. – 1877. – May, № 2, 7; July, № 9; August, № 17.
13. The Economist. – 1877. – April, № 14. – P. 415.
14. Pall Mall Gazette. – 1877. – May, № 7.
15. Оскал империи. Как в карикатуре возник образ России-медведя // LiveJournal. – 2016. – 16 авг. – URL: <https://www.livejournal.com>media> (дата обращения: 19.04.2023).
16. Биржевые ведомости. – 1877. – Май, № 25.
17. The Economist. – 1877. – May, № 19. – P. 556–557.
18. Daily Telegraph. – 1877. – May. – № 21.
19. The Economist. – 1877. – April, № 14. – P. 415; May, № 19. – P. 556–557; June, № 9. – P. 662–663; June, № 30. – P. 757–758.
20. Times. – 1877. – April, № 24.
21. Daily Telegraph. – 1877. – July, № 9.
22. Биржевые ведомости : газ. – 1877. – Июнь, № 26.
23. The Economist. – 1877. – April, № 21. – P. 442.
24. The Times. – 1877. – February, № 24.
25. Гражданин : газ. – 1877. – Октябрь, № 21.
26. Daily Telegraph. – 1877. – August, № 16.
27. Daily Telegraph. – 1877. – August, № 17.
28. Banbury Advertiser. – 1877. – June, № 21.
29. Belfast Telegraph. – 1877. – May, № 19.
30. Daily Telegraph. – 1877. – June, № 5.
31. Dublin Evening Mail. – 1877. – June, № 18;
32. East & South Devon Advertiser. – 1877.
33. Fifeshire Advertiser. – 1877. – June, № 9.
34. Banbury Advertiser. – 1877. – June, № 21.
35. Daily Telegraph. – 1877. – June, № 5.
36. Dublin Evening Mail. – 1877. – June, № 18.
37. Daily Telegraph. – 1877. – June, № 5.
38. Гражданин : газ. – 1877. – № 30. – С. 667.
39. Daily News. – 1877. – July, № 26.
40. Сын Отечества : жур. – 1877. – Август, № 23.
41. Игнатьев Н.П. Походные письма 1877 г. – М., 1999. – С. 219.
42. Pall Mall Gazette. – 1877. – May, № 7.
43. Сын отечества : жур. – 1877. – Июль, № 20.
44. Daily Telegraph. – 1877. – June, № 5; August, № 17.
45. Гражданин : газ. – 1877. – Октябрь, № 13.
46. Гражданин : газ. – 1878. – Январь, № 8.
47. Times. – 1877. – July, № 1.
48. Сын отечества. – 1877. – Июль, № 21.
49. Daily News. – 1877. – July, № 6.
50. Сын отечества : жур. – 1877. – Август, № 24.
51. Науменков О.А. Роберт Солсбери и его время. Викторианская Англия в лицах. – СПб., 2004. – С. 120–121.
52. Times. – 1877. – December, № 13.
53. Daily News. – 1877. – December, № 7.
54. The Economist. – 1877. – April, № 14. – P. 415; May, № 19. – P. 556; June, № 9. – P. 662; June, № 30. – P. 757–758.
55. Standard. – 1877. – December, № 7; 1878. – January, № 14.

56. Weekly Register and Catholic Standard. – 1878. – April, № 27; May, № 4.
57. Daily Telegraph. – 1877. – December, № 7.
58. Economist. – December, № 15. – P. 1481.
59. Times. – 1877. – December, № 13.
60. Daily Telegraph. – 1877. – December, № 7.
61. Сын отечества : жур. – 1877. – Август, № 24.

В. П. Огородников,
доктор философских наук, профессор

ПРОБЛЕМА ФИЛОСОФСКИХ ОСНОВАНИЙ НАУКИ

В ракурсе основных разделов философского знания – онтологии, гносеологии и логики – рассмотрены основные функции философии в отношении научного познания. Показана эвристическая ценность основных законов и принципов развития. В контексте различных интерпретаций открытий современного естествознания демонстрируется несостоятельность субъективно-идеалистических (особенно позитивистских), объективно-идеалистических и метафизических (антидиалектических) парадигмальных установок.

Аргументируется непреходящая актуальность и действенность диалектико-материалистической методологии для всех сфер научного познания.

Ключевые слова: мировоззрение, методология, материализм, диалектика, идеализм, метафизика, истина и ее критерий, позитивизм, детерминизм.

ВВЕДЕНИЕ

К началу XIX века развитие естествознания и техники определило развертывание промышленной революции. В наиболее развитых государствах мира в основном был совершен переход от ручного труда к машинному. Революция в производстве привела к политическим революциям – феодализм был сменен капитализмом. Эти процессы не могли не проявиться в усложнении отношений философии, все еще претендующей на роль «науки наук», и конкретно-научного знания, приобретшего практически полную независимость от философии.

В рамках отмеченного усложнения в середине XIX столетия появляется специфическая антифилософия – позитивизм. Ее родоначальник Огюст Конт объявляет конец философии и предлагает лозунг позитивизма «Наука – сама себе философия», по сей день пользующийся популярностью среди представителей конкретных наук. Появилась необходимость пересмотреть функции философского знания по отношению к науке. С этой задачей справилась разработанная К. Марксом и Ф. Энгельсом диалектико-материалистическая философия. В ней было показано, что новая философия не должна стремиться подменить конкретную науку. Философия обязана быть основанием синтеза основных выводов различных наук в единое научное мировоззрение и вместе с тем должна исполнять роль всеобщей методологии научного познания.

Далеко не все представители науки согласились принять и учесть в своей деятельности эти две основные функции философии в отношении науки. Однако дальнейшее развитие науки, переход на рубеже XIX–XX веков от классической к неклассической, а затем, в середине XX века, и к постнеклассической науке привели к подъему новой волны позитивистских взглядов (постпозитивизм) и показали справедливость и актуальность выводов философии диалектического материализма.

Задача настоящей работы – рассмотреть, как в наше время реализуются мировоззренческая и методологическая функции философии в отношении современной науки и какие проблемы возникают сегодня на путях этой реализации.

МИРОВОЗЗРЕНЧЕСКО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАУЧНОГО ПОЗНАНИЯ

По поводу выделения названных функций в современной философии науки, как правило, не возникает вопросов. Противоречия и споры между специалистами начинаются при интер-

претации основных категорий философского мировоззрения и методологии. Раскрытие поднятой темы требует монографического исследования, поэтому в рамках данной статьи ограничимся указаниями на главные проблемы использования философии как мировоззренческо-методологического основания науки.

Разнородность множества научных картин мира детерминируется не только специфическим предметным содержанием каждой науки, но и тем, какая философская мировоззренческая и методологическая концепция лежит в их основе. Когда философия еще только зарождалась, в ней уже наметились, а в процессе дальнейшей эволюции философского знания укрепились и обособились друг от друга, материалистическое и идеалистическое мировоззрения. Практически синхронно с этим размежеванием происходило разделение противоположных методов познания и преобразования действительности – диалектического и метафизического (антидиалектического).

Сделаем весьма важное для всей статьи замечание – здесь и далее термин «метафизика» используется в значении, которое в него вложил Г. Гегель, т. е. как антидиалектика. Этим он противопоставил свою диалектику предшествующей, не принимающей развития, философии. Однако многие современные философы (и ученые разных направлений) применяют понятие «метафизика» в значении науки о том, что в чувстве не дано, но составляет глубинную сущность, предельные основания всего чувственно воспринимаемого. Такая интерпретация восходит к аристотелевскому делению философии на первую, истинную, раскрывающую всеобщие первоначала и первопричины мира (позднее названную метафизикой), и на вторую, прикладную или физику. Сегодня использование этого устаревшего значения метафизики представляется некорректным. В таком случае всю физику элементарных частиц, квантовую механику и тому подобные научные сферы, связанные с изучением того, что в непосредственном чувственном наблюдении не дается, также можно называть «метафизикой».

С начала XX века под воздействием парадоксальных в отношении классической науки открытий физики элементарных частиц, а в дальнейшем – квантовой механики, в среде ученых-физиков, а потом и позитивистски настроенных философов, возникает стремление снять противоречия между идеализмом и материализмом, диалектикой и метафизикой. Однако знакомство с современными интерпретациями квантово-механических взаимодействий, равно как и с анализом причин переживаемого сегодня глобального социального кризиса, показывает, что данные противоположные мировоззренческие и методологические установки до сих пор препятствуют консенсусу между физиками и гуманитариями.

Связь философии и науки проходит именно по названным фундаментальным установкам, преломляющимся в различных разделах философского знания. Эти разделы отражают многопредметность философии, что согласуется с многоаспектностью науки. Мировоззренческая и методологическая функции философии в отношении науки проявляют себя в специфическом воздействии той или иной (противоположной) мировоззренческой или (и) методологической философской установки на интерпретацию научного факта. Кроме того, такие парадигмальные установки часто служат предпосылочным знанием, выступающим в качестве методологии обнаружения самих этих фактов. Наиболее ярким примером этого является указание И. Ньютона в начале его знаменитого труда «Математические начала натуральной философии» на то, что он будет в своей работе исходить из постулатов (Демокрита) о вечности и неразрушимости атомов, перемещающихся в абсолютном пространстве и убежденности (Платона) о существовании абсолютного времени [1, с. 30–32]. Такие философские метафизические (антидиалектические) идеи стали фундаментом всей классической науки.

В рамках обозначенной проблематики рассмотрим как «работают» на науку основные разделы философии.

1. ОНТОЛОГИЯ [*ontologia* (лат.) – учение о сущем].

Исторически философская онтология – это то, на чем базировались и из чего вырастали все остальные разделы философского знания. Онтология античных философов попыталась

объяснить объективный мир, не прибегая к постулатам божественных причин. В этом философия качественно отличалась от предшествующей ей мифологии и религии. В рамках онтологии открывались и формулировались всеобщие законы и принципы становления и развития. Первый известный нам философ Древней Греции Фалес заявил, что вода является и субстратом, и субстанцией всего сущего. Здесь он предстает перед нами как несомненный материалист.

Онтологический материализм – необходимая предпосылка научного познания во всех его областях: в естествознании, технических науках, философии, социальных и гуманитарных науках. Как показывает вся история науки, вне материализма и диалектики, как мировоззренческих и методологических установок, не может быть сформулирована никакая картина мира, никакое единое, логически непротиворечивое мировоззрение. Ярким примером сказанного является формально-логическое противоречие между объективно-идеалистической системой мира Г. Гегеля, приведшей его к выводу о завершенности развития «идеи государственности» в современном ему полуфеодальном прусском государстве, и его диалектическим методом, который несовместим с постулированием законченности, завершенности развития чего-либо.

Второй пример – субъективно-идеалистическая трактовка открытых на рубеже XIX–XX веков микрочастиц как якобы существующих только в формулах, принятых учеными «по согласию» (т. е. конвенционально), которая стала основанием глубокого кризиса естествознания. Последствия этого кризиса находят свое воплощение в некоторых заявлениях современных специалистов в области квантовой механики. Например, в утверждении, что редукция волнового пакета, представляющего собой микрообъект, в частицу или волну зависит от того, наблюдает ли кто-нибудь из экспериментаторов за его прохождением через прорези в пластине или нет...

Что же касается современных исследований развития общества, то здесь субъективно-идеалистическая трактовка истории стала чуть ли не правилом. Отсюда возникают абсолютизация роли «исторических личностей» как в давних событиях, так и в современных, а также упование на то, что некий выдающийся руководитель может, пренебрегая объективными основаниями, повернуть социальный процесс в благоприятную сторону, и тому подобные идеи. Рассмотренные примеры показывают, что та или иная философская установка может решающим образом повлиять на интерпретацию любого факта науки, и, как следствие, на социальное развитие.

Кроме указанных проблем с интерпретацией научных фактов возникает еще одна проблема – преобладания и роста научных кадров. Ученый, находящийся в плену идеалистического мировоззрения не может воспитывать новое поколение исследователей объективного мира постольку, поскольку он не считает то, что исследуется, объективной реальностью.

Настоящими эвристическими алгоритмами для любой науки выступают открытые Г. Гегелем и материалистически сформулированные Ф. Энгельсом всеобщие законы развития (законы диалектики), составляющие фундамент философской онтологии.

Эти законы ориентируют ученых на следующее:

1) поиск причин изменения и развития в борьбе противоположных начал – закон единства и борьбы противоположностей. При этом метафизическая абсолютизация в качестве причины какой-то одной из противоположностей всегда ведет исследование в тупик (внутреннего или внешнего воздействия, воздействия или противодействия, ассимиляции или диссимиляции, движения или покоя, эволюции или революции и тому подобного). Представители классической физики, химии и биологии всегда сознательно или подсознательно руководствовались законом единства и борьбы противоположностей при открытии и формулировании своих специфических законов. Примерами сказанному служат: 3-й закон Ньютона, закон единства наследственности и изменчивости в развитии живого, связь ассимиляции и диссимиляции вещества в процессе метаболизма и все другие конкретные законы развития природы, общества и их взаимодействия. Все указанные законы фиксируются уравнениями, пред-

ставляющими собой, в главном и основном, равенство (единство) и борьбу противоположностей;

2) определение меры как связи количества и качества в конкретных процессах – закон единства количественных и качественных изменений. Этот закон играет важнейшую роль в формулировании конкретных законов развития как живого, так и абиотического. С его помощью можно обнаружить границы меры, изменяясь в рамках которых, система сохраняет свое качество (эволюция), а за пределами которых система переходит в новое качественное состояние (революция) или элиминируется. Закон единства количества и качества фиксируется и в законах механики, и в законе Ома, и в периодическом законе Д. И. Менделеева. Всеобщность закона подтверждается тем, что он действует во всех без исключения процессах природы и общества. Отсюда следует вывод, что эволюция и революция – необходимые составляющие всякого развития, а не только живой природы и общества, как многие до сих пор полагают;

3) раскрытие общих тенденций направленности процесса развития – закон отрицания отрицания. Развитие характеризуется как система направленных изменений, поэтому закон отрицания отрицания позволяет отличить систему изменений от развивающейся системы. Кроме того, закон выявляет диалектическую связь изменчивости и устойчивости в каждом отдельном акте отрицания, включающем (по Гегелю) три перехода: 1) бытие – бытие (сохранение, удержание положительного); 2) бытие – небытие (исчезновение старого); 3) небытие – бытие (возникновение нового). Только когда все эти три перехода в своем нерасчленном единстве представляют *одно* отрицание, становится возможным второе отрицание, проходящее по тому же алгоритму триединства перехода в новое качество и характеризующееся как отрицание отрицания. В результате такого двойного отрицания система начинает напоминать состояние, присущее ей до первого отрицания. Но это не процесс возвращения к исходному состоянию по кругу, а прохождение «по витку спирали» к тому же качеству, но на новой, высшей основе. В развитии живого этот закон проявляется повсеместно, на всех уровнях организации и развития живых организмов, – от одноклеточных существ и растений до высших млекопитающих. В марксистской философии истории показано, что рассматриваемый закон проявляется и в истории общества. Первобытный коммунизм, основывавшийся на общественной собственности на средства производства (самый продолжительный период истории человечества – около 95 тысяч лет) отрицается государственным строем, основанным на частной собственности. Диалектическая логика закона отрицания отрицания позволяет прогнозировать отрицание этого строя новым общественным устройством, основанным на общественной собственности – новым коммунизмом. Эту идею К. Маркс и Ф. Энгельс развернули в теории научного коммунизма. И хотя эта теория с момента ее возникновения и до сегодняшних дней яростно опровергается апологетами капитализма, появились концепции, близкие теории научного коммунизма, например подержанная большинством философов, политологов, социологов и экономистов концепция «информационного общества» Э. Тоффлера.

Интересно отметить, что всеобщие законы развития действуют не только в саморазвивающихся системах, но и в системах, развиваемых человеком. Например, звуко- и видео-записывающая техника претерпела в конце XIX–XX веков следующие метаморфозы: от механического дискового граммофона и электропатефона, в которых запись и воспроизведение осуществлялись на вращающейся пластинке, к пленочному магнитофону (40–50-е годы XX века) и видеомагнитофону, где носителем являлась магнитная лента. Появление цифровой технологии привело к смене носителя – им опять стал диск, сначала – магнитный, потом – оптико-лазерный. «Возвращение» к диску как носителю информации можно охарактеризовать как действие закона отрицания отрицания. Такое возвращение стало необходимым этапом в становлении и развитии компьютерной техники, повсеместно использующей жесткие диски и сменные диски для записи и воспроизведения.

2. ГНОСЕОЛОГИЯ [γνώσις (греч.) – гносис – знание] и [λόγος (греч.) – логос – учение].

Философская гносеология, как теория познания, не может быть отделена от онтологии, так как последняя определяет сущностные свойства бытия. Такое определение и есть момент познания. В этом проявляется единство диалектически истолкованной онтологии как диалектики с диалектической теорией познания. Диалектическая гносеология использует объективную диалектику – онтологию как свое основание и методологию. Объективная диалектика, будучи адекватно отраженной, становится диалектикой познания – субъективной диалектикой. Так, адекватное отражение закона единства и борьбы противоположностей позволяет представить его в субъективной форме и использовать в познании объективной и субъективной реальности.

Категориальный аппарат гносеологии представлен прежде всего понятиями «истина» и «заблуждение». Все конкретные науки имеют целью истинное знание, но ни одна из них не может претендовать на определение истины и ее отличия от заблуждения, т. е. критерия истины. Определение этих понятий является прерогативой философской гносеологии.

Первое определение сущности истины дал Платон: «Тот, кто говорит о вещах в соответствии с тем, каковы они есть, говорит истину, тот же, кто говорит о них иначе – лжет» [2, с. 417]. Ему и его учителю Сократу принадлежит и специфическое для всех последующих объективно-идеалистических концепций определение критерия истины. Истинное знание получается человеком в результате припоминания его бессмертной душой того, что она знала, когда пребывала в мире идей, мире чистых сущностей.

Знающий истину человек является временным обладателем «откровенной» души, незнающий – «скрытной». Чувственное познание дает не истину, а мнение.

Из приведенных рассуждений мы можем заключить, что определение критерия истины всецело связано с решением основного онтологического вопроса «Что первично, что чем порождено в связи материального и сверхъестественного (не человеческого) идеального?». Это и есть основной вопрос философии, разделяющий философов (или философствующих ученых, писателей, художников, обывателей) на материалистов и идеалистов.

Для объективного идеалиста критерием истины будут:

- 1) соответствие высказывания человека с чем-то, что представлено в мире идей (Сократ, Платон, неоплатоники);
- 2) соответствие высказывания человека тексту «священного писания» (все религии);
- 3) соответствие высказывания человека моменту самопознания Абсолютной идеи (Г. Гегель);
- 4) соответствие высказывания человека некой информации, полученной из информационного поля (матрицы) – современный вариант объективного идеализма.

С позиций диалектического материализма нетрудно заметить, что все эти суждения об истинности высказываний человека не являются критериями истинности. Как, к примеру, проверить, соответствует ли высказывание тому, что представлено в мире «вечных сущностей», или получено ли оно из «информационного поля»? Сами эти понятия образованы не познанием, а верой, приняты на веру. Поэтому нам тут предлагают не проверить, а поверить, что не соответствует сущности научного познания.

Другие критерии истинности суждений выдвигаются теми мыслителями, кто в теории познания придерживаются субъективно-идеалистических установок. В соответствии с этими установками критерием истинности суждения выдвигается то ясность и очевидность этого суждения (Р. Декарт), то признание этого суждения истинным большинством (А. Богданов), то практическая полезность суждения (прагматизм – У. Джеймс), то соответствие суждения непосредственно-чувственным данным (неопозитивизм – М. Шлик, Б. Рассел), то логическая непротиворечивость суждения (логический позитивизм – Р. Карнап).

Ни в какой науке указанные и подобные им варианты критерия истинности суждений неприменимы, так как в них истина лишена своего объективного содержания и тем самым ликвидирована. Наиболее распространенной ошибкой научного исследования в неклассической и постнеклассической науке является отождествление логичности и истинности. Такое

отождествление часто приводит к смешению до неразличимости концептуального, математически строго выверенного построения с объективной реальностью [3].

Подлинным критерием истины выступает практика, т. е. совместная деятельность людей, направленная на целесообразное преобразование природы, общества или общественного сознания (например, педагогическая или просветительская практика). Положение о практике как о критерии истинности было разработано К. Марксом [4].

Вместе с тем практика часто отстает от теоретических разработок и в этот момент не может выступать критерием их истинности. Например, специальная теория относительности А. Эйнштейна была опубликована в 1905 году и почти полвека «ждала» своего практического подтверждения. Только на ускорителях элементарных частиц – циклотронах и синхротронах стало возможным разогнать элементарные частицы до субсветовых скоростей, при которых наблюдалось увеличение срока «жизни» этих частиц в точном соответствии с известной формулой теории относительности:

$$T_{\text{дв}} = \frac{T_0}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{C^2}}};$$

где $T_{\text{дв}}$ – временной интервал движущегося тела (системы);

T_0 – временной интервал того же события для покоящейся системы;

V – скорость движения рассматриваемой системы;

C – скорость света ($C = 300\,000$ км/с).

Неотъемлемой составляющей гносеологии является философская методология. Обычно с философской методологией сопоставляется диалектический и метафизический методы, которые были рассмотрены выше. Однако, как было показано, материалистическое или идеалистическое (объективное или субъективное) мировоззрения в их применении также выступают важнейшими методами. В то же время философская методология не исчерпывается рассмотренными установками. К ней относятся и философские принципы. Они требуют отдельного анализа, поэтому остановимся на самых важных в мировоззренческом и методологическом отношении.

Фундаментальным философским принципом является *принцип детерминизма*, с позиций которого всякий момент материального и идеального мира в своих конкретных свойствах и отношениях определен системой причинных и не причинных детерминантов [5]. Причина – порождающий детерминант – опосредована в своем действии рядом не причинных факторов – условий, функциональных детерминантов, инспираций и тому подобных.

Например, вариация условий военного конфликта [уровень материального оснащения вооруженных сил (объективный фактор), подготовленность военных специалистов, господствующие в странах, участвующих в конфликте, политические взгляды и настроения (субъективный фактор) определяют конкретные характеристики состоявшегося конфликта (время начала, длительность и характер протекания, возможность перерастания в полномасштабную войну)]. Здесь мы еще раз сталкиваемся с действием закона единства количества и качества. Конкретный военный конфликт будет иметь конкретную дату начала и окончания, а не «от и до». Всякий конкретный показатель является случайностью-проявлением относительной необходимости, представленной мерой.

Рассмотренный пример иллюстрирует диалектический детерминизм. Метафизический детерминизм абсолютизирует действие причины, не принимая во внимание действие не причинных детерминантов, и потому объявляет все процессы фатально необходимыми. Индетерминизм не видит порождающих факторов – причин и потому считает весь мир сплетением чистых случайностей. Как видно из рассмотрения, здесь мы еще раз сталкиваемся с единством онтологии и гносеологии. Детерминизм – в сущности онтологический принцип, но в применении к познавательным процессам он раскрывается как принцип гносеологический, как алгоритм познания системы причинных и не причинных детерминантов всякого про-

цесса, включая и процесс познания. При этом причину, в соответствии с приведенным выше анализом основных законов развития, нужно искать во внутреннем противоречии системы.

Принцип детерминизма конкретизируют два других важных в мировоззренческом и методологическом отношениях принципа философии – принцип всеобщей связи и принцип развития.

В процессе познания всякий ученый должен владеть еще одним диалектическим принципом – принципом связи и единства исторического и логического [6]. Этот принцип призывает исследователя вначале проследить историю изучаемого процесса во всем доступном многообразии, а затем выявить в этом многообразии общность, повторяемость, закономерность. Так, при помощи индуктивного умозаключения находится общее в единичном, необходимое и закономерное в случайном. Примером может служить исследование Ю. В. Кулешова и А. А. Корыстина, в котором отмечается, что для того, чтобы установить влияние атмосферы на радиолокационные и радионавигационные системы и средства, следует проанализировать историю изменения климатических геофизических условий в данной области в течение многих лет [7, с. 168]. Более сложной задачей является выявление закономерностей развития общества в многообразии исторических событий. Здесь уже одним принципом связи исторического и логического не обойдешься. Надо использовать весь арсенал диалектико-материалистической методологии.

Из предшествующего анализа объективно- и субъективно-идеалистической методологии ясно, что она не может способствовать познанию объективных закономерностей развития ни природы, ни общества.

Нацизм и фашизм, с которыми приходится сегодня бороться России далеко не только на идеологическом фронте, является одним из вариантов субъективно-идеалистического истолкования процесса общественного развития. Идеология нацизма и фашизма пытается подменить объективные классовые противоречия надуманными противоречиями между национальностями.

Если практическая политика начинает ставить перед собой подобные цели, трудно ожидать благоприятных результатов для конкретного общества и, даже, как показывают недавние исторические события, для всего человечества. И вновь субъективный идеализм проявляет свою органическую связь с метафизическим методом.

Истинное единство исторического и логического в изучении истории общества, науки, любого вида человеческой деятельности выявляется только при использовании в этом рассмотрении диалектико-материалистической методологии.

3. ЛОГИКА.

Говоря о связи исторического и логического, нельзя обойти вниманием и саму логику, «отец» которой, Аристотель, ставил ее выше всех наук, потому что она является «органом», орудием мышления, инструментом познания и всеобщей научной методологией.

Логические методы и сегодня выступают, и всегда будут выступать, в качестве общенаучных. Прежде чем о чем-то рассуждать или спорить, учил великий античный мыслитель, необходимо определить основные понятия. Это указание и поныне является правилом не только для ученых, но для специалистов в любой области человеческой деятельности.

К примеру, наиболее спорным термином в мировой политике является «демократия». Женщина США растоптала в последние десятилетия суверенитет многих стран во имя установления в них «демократии». Но из высказываний ведущих политиков Запада видно, что их представления о демократии более чем превратны. Так, экс-президент США Барак Обама заявил, что он гордится установлением в годы его правления подлинной демократии, что нашло выражение в принятии закона об однополых браках. Может быть, военные вторжения США в Ливию, Ирак и другие страны имели главной целью узаконивание в них однополых браков? Сегодня США и страны НАТО напрямую угрожают России также установлением в ней демократии... Может быть, пора, наконец, адекватно определить данное понятие?

Между тем логика требует соблюдать определенные правила при определении понятия, которые мы в силу ограниченности рамками данной статьи не будем рассматривать, отослав читателя для ознакомления с ними к соответствующим работам по формальной логике [8, 9]. Там же можно найти и классические правила построения суждений и умозаключений, доказательства и опровержения.

Конечно же, всякий ученый обязан владеть и использовать эти правила. Логичность построения научной теории, политической доктрины и даже военного приказа – необходимое, хотя и недостаточное основание их истинности. Логичность – залог и критерий научности всякой письменной или устной речи. Алогичный, полный внутренних формально логических противоречий текст не может даже претендовать на истинность. Алогичность – дорога к заблуждениям в теории и тяжелым ошибкам в практике.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В силу ограничения объема статьи здесь обозначен только абрис проблемы философских оснований науки. Вместе с тем указано мировоззренческое и методологическое значение для ее функционирования фундаментальных положений основных разделов философского знания. Всестороннее раскрытие этих оснований – цель дальнейших исследований.

Однако произведенный анализ дает основание заключить, что главными парадигмальными философскими установками для всего научного познания являются материализм и диалектика, синтезированные в диалектико-материалистическом мировоззрении и методологии. Именно они, как показывает история развития науки, позволяют исследователю любой предметной области достичь в познании истины.

Список используемых источников

1. *Ньютон И.* Математические начала натуральной философии. – М.: Наука, 1989. – 690 с.
2. *Платон.* Кратил // Собр. соч.: в 4 т. – М.: Мысль, 1968. – Т. 1. – 623 с.
3. *Ogorodnikov V. P., Oganyan K. M.* On the Perceptual, the Conceptual, the Objectively Real and the Problem of Truth in Cosmogony and Cosmology // *Wisdom.* – 2020. – Vol. 14, № 1. – P. 56–69.
4. *Маркс К.* Тезисы о Фейербахе // *Маркс К., Энгельс Ф.* Соч. : в 43 т. – 2-е изд. – Т. 3. – С. 1–2.
5. *Огородников В. П.* Система детерминаций научного поиска // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2022. – Вып. 682. – С. 278–290.
6. *Огородников В. П.* Связь исторического и логического в формировании идеалов и норм научного исследования // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2020. – Вып. 673. – С. 270–279.
7. *Корыстин А. А., Кулешов Ю. В.* Геофизическое обеспечение применения радиолокационных и радионавигационных систем и сред // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2022. – Вып. 685. – С. 167–185.
8. *Огородников В. П.* Логика : учеб. пособие. – СПб. : Питер, 2004. – 176 с.
9. *Войшвилло Е. К., Дегтярев М. Г.* Логика : учебник для вузов. – М., 2001 – 528 с.

Н. Н. Гусев,
доктор технических наук, профессор;
А. О. Кучеренко,
кандидат технических наук;
Д. П. Мандрица,
кандидат технических наук, доцент;
В. О. Маслов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСОВ ВОЗБУЖДЕНИЯ ВТОРИЧНОЙ АППАРАТУРЫ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА НА ПОДАВЛЕНИЕ ВЫСШИХ ГАРМОНИК КОЛЕБАНИЙ РЕЗОНАТОРОВ СТРУННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Статья посвящена исследованию зависимости степени подавления амплитуды высших гармоник колебаний струны струнного преобразователя от параметров импульса возбуждения вторичной аппаратуры систем мониторинга промышленно опасных, технически сложных и уникальных объектов, в том числе объектов наземной космической инфраструктуры. Эксперимент проводился на опытных образцах струнных преобразователей, при конструировании которых реализованы технические решения по патентам 2685803, 2777515 и 2794285 РФ, а также серийно выпускаемых струнных преобразователях ПСАС-40, АД-40, ГД-4. В статье приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований, показывающие влияние на подавление амплитуд высших гармоник колебаний струны параметров импульсов возбуждения вторичной аппаратуры систем мониторинга. Проанализирован вклад каждого из параметров импульса возбуждения в формирование результирующей амплитуды ее колебаний. Установлена связь между погрешностью измерения информативного параметра струнного преобразователя – частоты колебания основного тона – и параметрами импульсов возбуждения вторичной аппаратуры систем мониторинга. В статье предложены пути расширения диапазона измерения параметров напряженно-деформированного состояния строительных конструкций промышленно опасных, технически сложных и уникальных объектов с помощью струнных преобразователей.

Ключевые слова: системы контроля технического состояния, мониторинг, первичный струнный преобразователь, амплитуда импульса силы, амплитуда колебания струны, напряженно-деформированное состояние, вторичная аппаратура.

ВВЕДЕНИЕ

Техническое состояние промышленно опасных, технически сложных и уникальных объектов, в том числе объектов наземной космической инфраструктуры (ОНКИ), оценивается путем непрерывного контроля напряженно-деформированного состояния (НДС) их основных несущих конструкций посредством систем мониторинга (СМ) [1–5]. В качестве первичных преобразователей в таких системах все чаще применяются, как у нас в стране, так и за рубежом [6–8], частотные, в частности струнные, преобразователи (СП) с электромагнитным способом возбуждения и совмещенной электромагнитной катушкой возбуждения (ЭКВ) [9].

Способ измерения с помощью СП основывается на зависимости частоты ω (или периода T) колебания частотного резонатора (струны) от напряжения растяжения струны или ее длины, которые в каждом конкретном СП пропорциональны измеряемому параметру P (линейному перемещению, давлению, температуре и т. д.).

При подаче на клеммы ЭКВ электрического импульса в ней генерируется импульс силы возбуждения с определенными амплитудой F и длительностью $\tau_{и}$. Импульс силы «щипком» возбуждает затухающие колебания струны y , наводящие в электромагнитной катушке ЭДС e , частоту ω или период T , которой можно измерять до некоторого заранее заданного значения амплитуды, определяемого уровнем помех, соответствующего минимально допустимому

значению амплитуды колебания струны y_{\min} . Максимальное значение амплитуды колебаний струны y_{\max} ограничено конструктивным зазором между струной в невозбужденном состоянии и керном ЭКВ δ_0^k , значение которого для серийно выпускаемых СП лежит в пределах 0,35–0,50 мм [9, 10]. При этом импульсы силы следуют с периодом T^0 , длительность которых больше длительности периода T^* затухания амплитуды колебания струны до минимально допустимого значения y_{\min} .

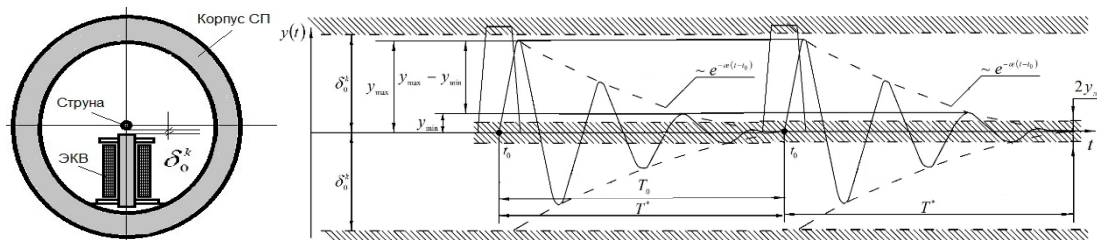


Рис. 1. Возбуждение колебаний струны импульсом трапецидальной формы при $T_0 > T^*$

Возбуждение колебаний струны СП, как правило, осуществляется импульсным способом, при этом сами колебания происходят в режиме свободных колебаний. Однако импульсный способ возбуждения снижает эффективность применения СП в СМ [10], что обусловлено влиянием параметров импульса возбуждения на помехозащищенность СМ. Известны два типа СП: первый – с постоянной длиной и переменной силой натяжения, второй – с постоянной силой натяжения и переменной длиной. К первому типу относятся серийно выпускаемые и широко используемые СП типа ПСАС-40, АД-40, ГД-4 и др., ко второму типу – СП перемещения (по патентам 2685803, 2777515 и 2794285 РФ), разработанные авторами статьи.

Зависимость частоты колебания струны от ее параметров (при постоянстве массы струны m_s и плотности ее материала ρ_s) описывается выражением [10]

$$f_n = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{N \cdot l}{m_s}} = \frac{n}{2} \sqrt{\frac{N}{l \cdot m_s}} = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho_s}}, \quad (1)$$

где f_n – частота поперечных колебания n -й гармоники струны;
 N – сила натяжения струны;
 σ – напряжение растяжения в струне;
 l – длина струны;
 m_s – масса струны;
 ρ_s – плотность материала струны.

Многолетний опыт эксплуатации СП показал [11], что параметры импульса возбуждения влияют на амплитуду (а следовательно, амплитудную погрешность) и гармонический состав колебаний струны. Эти обстоятельства снижают точность измерения (характеристику, выражающую степень соответствия результатов измерения настоящему значению измеряемой величины) и помехоустойчивость [способность устройства (системы) выполнять свои функции при наличии помех] СМ в целом [12], так как импульсный способ возбуждения колебаний струны неизбежно сопровождается возбуждением высших гармоник [12–14]. При постоянстве силы натяжения струны N и полном затухании колебаний от предыдущего импульса возбуждений $T_0 > T^*$ (рис. 2,а), т. е. при отсутствии сдвига фазы импульса возбуждений относительно фазы колебания струны, состав гармоник зависит от следующих параметров импульса возбуждения: амплитуды F (рис. 2,б–д), длительности τ_n (рис. 2,в), длительности фронтов τ_ϕ (рис. 2,з) и точки приложения импульса силы x_0 (рис. 2,б). При трапецидальной форме импульса возбуждения принимается, что $\tau_n = \tau_{1/2}$ (рис. 2,в).

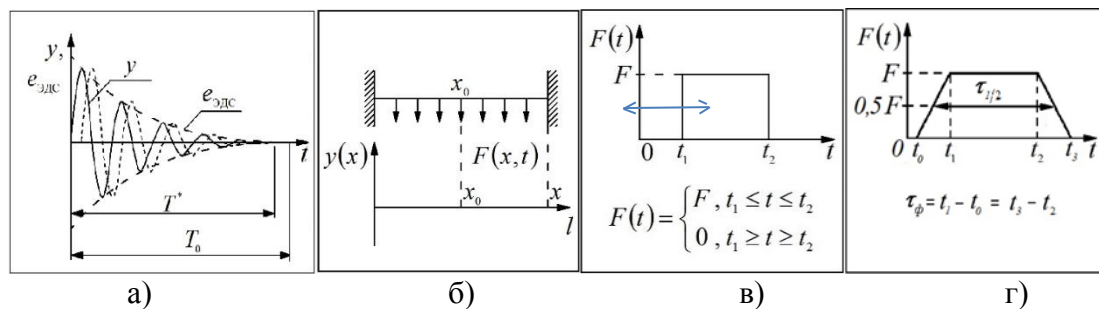


Рис. 2. Параметры импульсов возбуждения колебаний струны

МЕТОДЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ СТРУН СТРУННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА

Несмотря на то, что СП с электромагнитным способом возбуждения и совмещенной ЭКВ используются более ста лет [2], гармонический состав в колебательных процессах струн СП до сих пор до конца не изучен, что затрудняет использование СП в современных СМ в качестве измерителей параметров НДС строительных конструкций объектов. Наличие гармонических составляющих в процессе колебания струны присуще как для СП первого, так и второго типов. Параметры импульса возбуждения, кроме того, влияют на амплитуду колебания основного тона колебания струны [8], а следовательно, на амплитудную погрешность измерения. Исследованию влияния перечисленных аспектов посвящена данная статья.

Исследованиям реализации режима свободных колебаний СП посвящены труды А. П. Северова, Н. Н. Гусева, А. О. Кучеренко и других авторов [2]. В этом режиме колебания струны возбуждаются импульсами «запроса», поступающими от генератора импульсов вторичной аппаратуры СМ. Для прямоугольной формы импульса и формы, близкой к трапецеидальной, выражение для амплитуды колебания струны $y(x, t)$, возбуждаемой импульсом силы $F(x, t)$, известна, а сами колебания имеют затухающий характер (рис. 2, а; рис. 2) [2]:

$$y(x, t) = \frac{2}{\pi \cdot \varepsilon \cdot c} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin K_n \cdot x_0 \cdot \sin K_n \cdot x \cdot \frac{2F}{\omega_n} \cdot \exp \left[-\alpha_n \left(t - \frac{t_1 - t_2}{2} \right) \right] \times \\ \times \sin \left[\omega_n \left(t - \frac{t_1 - t_2}{2} \right) \right] \cdot \sin \frac{\omega_n \cdot \tau_{1/2}}{2}, \quad (2)$$

где (x, t) – плоскость, в которой происходят колебания струны;

c – скорость распространения поперечной волны по струне;

ω_n – круговая частота n -й гармоники;

K_n – волновое число n -й гармоники;

t – текущий момент времени;

x_0 – точка приложения импульса силы $F(x, t)$ (рис. 2, а);

F – амплитуда силы (рис. 2, б);

t_1, t_2 – моменты времени, соответствующие началу и окончанию действия импульса $F(t)$ (см. рис. 1, б);

τ_n – длительность импульса силы (рис. 2, в), при этом $\tau_n = \tau_{1/2}$;

α_n – скорость затухания n -й гармоники.

Вызванные таким образом свободные колебания струны индуцируют в (ЭКВ) СП электродвижущую силу $e_{ЭДС}$, сдвинутую по фазе относительно колебаний струны на 90° (рис. 2, а).

Величина $e_{ЭДС}$ определяется выражением [9]

$$e_{ЭДС} = 4 \cdot N^6 \cdot f \cdot B_o \cdot S_m \cdot y / \delta_o^k, \quad (3)$$

где N^e – число витков в электромагнитной катушке возбуждения;
 f – частота колебаний струны;
 B_o – индукция магнитного поля;
 S_m – площадь, перекрываемая струной и полюсом электромагнита;
 y – прогиб струны в центре струны (см. рис. 1,б);
 δ_o^k – конструктивный зазор между струной в невозбужденном состоянии и керном ЭКВ.

Рассмотрим влияние параметров импульса возбуждения – амплитуды F (см. рис. 2,в, з), длительности τ_n (см. рис. 2,в, з), длительности фронтов τ_ϕ (см. рис. 2,з) и точки приложения импульса x_o (см. рис. 2,б) – на динамику колебания струны СП.

Амплитуда F импульса возбуждения. Зависимость амплитуды колебания струны, а также ее отдельных гармоник имеет прямую пропорциональность от амплитуды F импульса возбуждения, что следует из выражения (2).

Увеличивая амплитуду импульса возбуждения и тем самым амплитуду колебания струны, можно увеличить соотношение «сигнал/шум» и тем самым увеличить помехоустойчивость СМ [15, 16]. Однако увеличение амплитуды колебаний струны возможно до определенных пределов, а именно, до достижения амплитуды колебаний струны y значения δ_o^k , после чего начинается соударение струны с керном ЭКВ (рис. 3) и сигнал с выхода СП утрачивает синусоидальную форму вследствие возбуждения высших гармоник и возникновения переходных процессов.

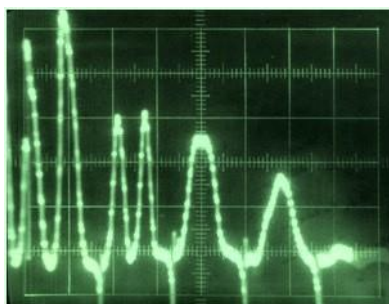


Рис. 3. Возбуждение колебаний струны импульсом силы трапецидальной формы при $T^* > T^0$, сигнал с выхода СП утрачивает синусоидальную форму

Следовательно, одним из путей подавления высших гармоник является снижение амплитуды импульса возбуждения F колебаний до значения, обеспечивающего соотношение $y < \delta_o^k$, т. е. исключением переходных процессов вследствие соударения струны с керном ЭКВ.

Длительность импульса возбуждения и его фронтов. Теоретические зависимости $y_1(\tau_n)$ для СП типа ПСАС-40, АД-40, ГД-4 представлены на рис. 4.

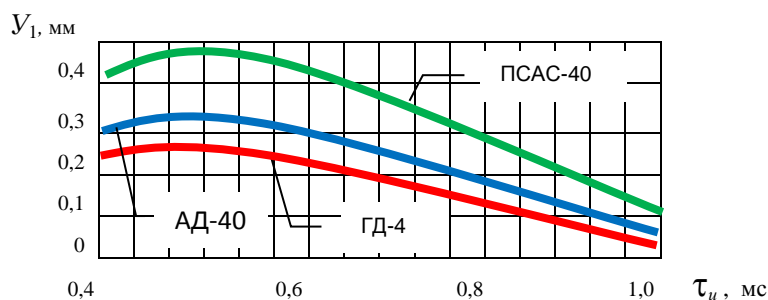


Рис. 4. Теоретические зависимости $y_1(\tau_n)$ при $y < \delta_o^k$ и $T^* > T^0$.

Анализ выражение (2) позволяет сделать следующие выводы.

Во-первых, результат воздействия импульса силы на амплитуду колебаний струны зависит от его длительности τ_n (см. рис. 2,в, з). При прямоугольной форме импульса возбуждения максимальная амплитуда колебаний n -й гармоники достигается при следующих условиях:

$$\frac{\omega_n \cdot \tau_n}{2} = \frac{\pi}{2} (2l + 1), \quad (4)$$

$$\tau_n = \frac{\pi}{\omega_n} (2l + 1) = \frac{T}{2n} (2l + 1), \quad (5)$$

где l – целое число;

T – период колебания струны.

Подбирая $\tau_n = T/3$, $\tau_n = 2T/3$ и т. д., можно полностью подавить возбуждение самой сильной из высших гармоник с $n = 3$ [11]. Для эффективного возбуждения первой гармоники необходимо выбирать компромиссную длительность τ_n в интервале $[T/3 \div 2T/3]$.

Во-вторых, динамика колебания струны при трапецеидальной форме импульса возбуждения выглядит так же, как и под действием бесконечно короткого импульса, но приложенного в момент $t = (t_1 + t_2)/2$, т. е. в центре трапецеидального импульса (см. рис. 2,з), что обусловлено наличием множителя $\sin \omega_n (t - (t_1 + t_2)/2)$.

В-третьих, существует эффект интерференции от откликов, вызванных передним и задним фронтами. Наличие этого эффекта позволяет возбудить, например, первую гармонику и подавить третью, так же как и в случае с импульсом прямоугольной формы. При этом роль длительности импульса (см. рис. 2,з) выполняет длительность импульса на полувысоте F , т. е. $\tau_{1/2}$ (см. рис. 2,з). Поэтому условие максимальной амплитуды 1-й гармоники принимает вид [2]:

$$\frac{\omega_n \cdot \tau_{1/2}}{2} = \frac{\pi}{2} (l + 1), \quad (6)$$

$$\tau_{1/2} = \frac{T}{2n} (l + 1). \quad (7)$$

В-четвертых, по сравнению с прямоугольной формой импульса у трапецеидальной формы существует значительное отличие, которое состоит в том, что, регулируя длительность фронта τ_ϕ (см. рис. 2,в) трапецеидального импульса, можно добиться дополнительного подавления высших гармоник струны. Динамика колебаний струны под действием импульса возбуждения с $\tau_\phi \leq 2/\omega_n$ не отличается от динамики колебаний под действием прямоугольного импульса.

Если τ_ϕ сравнима или больше периода T , то в динамике колебаний струны необходимо учитывать коэффициент возбуждения n -й гармоники K_B , обусловленной интерференцией переднего и заднего фронтов импульса с конечной длительностью τ_ϕ [17]:

$$K_B = \frac{2}{\omega_n \cdot \tau_\phi} \cdot \sin = \frac{\omega_n \cdot \tau_\phi}{2}. \quad (8)$$

Коэффициент подавления n -й гармоники K_Π , обусловленный применением трапецеидальной формы импульса (вместо прямоугольной), имеет следующий вид [17]:

$$K_\Pi = K_B^{-1}. \quad (9)$$

При $\tau_{\phi} \rightarrow 0$ $K_{II} = 1$. Теоретические зависимости $K_{II}(\tau_{\phi})$ для выпускаемых промышленностью СП представлены на рис. 5 [17].

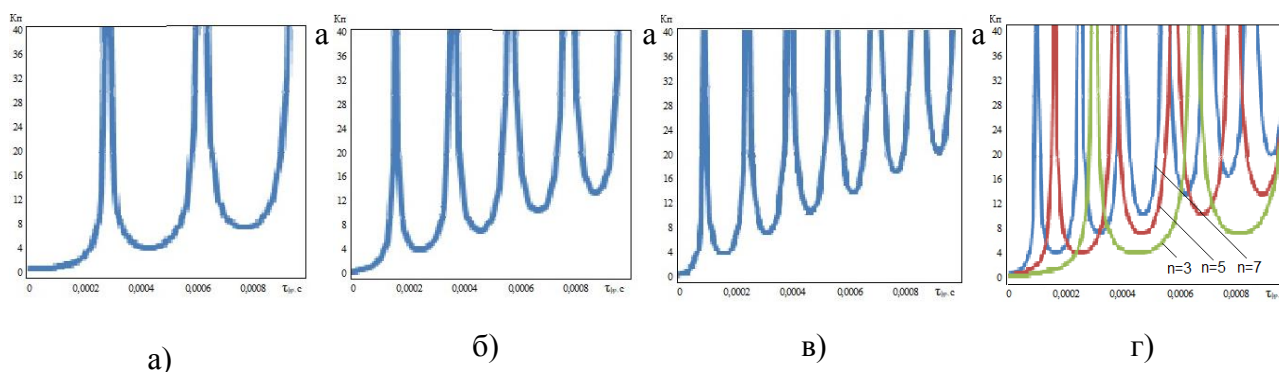


Рис. 5. Теоретические зависимости $K_{II}(\tau_{\phi})$:
 а – для 3-й гармоники; б – для 5-й гармоники; в – для 7-й гармоники;
 г – совмещенные графики для гармоник 3, 5 и 7

Следовательно, вторым путем подавления высших гармоник является регулирование длительности импульса возбуждения $\tau_{и}$ и его фронтов τ_{ϕ} .

Точка приложения импульса x_0 . Анализ зависимости (2) показывает, что гармонический состав колебаний струны является функцией ее длины l и точки приложения импульса силы $x_0 = x$ (см. рис. 2,б).

Принимая во внимание тот факт, что в выпускаемых промышленностью СП (ПСАС-40, ГД-4, АД-40) длина струны l и точка приложения импульса силы $x_0 = x$ – величины постоянные, а $x_0 = l/2$, влияние параметров l и x_0 на гармонический состав колебаний струны можно считать ничтожным и оно может не учитываться в оценке их влияния на амплитуду колебания струны СП первого типа.

Однако для второго типа СП (по патентам 2685803, 2777515 и 2794285 РФ) [18–20] параметры l , x и x_0 являются переменными величинами, а их влияние на отклик струны после воздействия на нее импульса силы не изучено.

Теоретическая зависимость амплитуды колебаний струны от ее длины, полученная авторами при $\tau_{и} = \text{const}$, представлена на рис. 6.

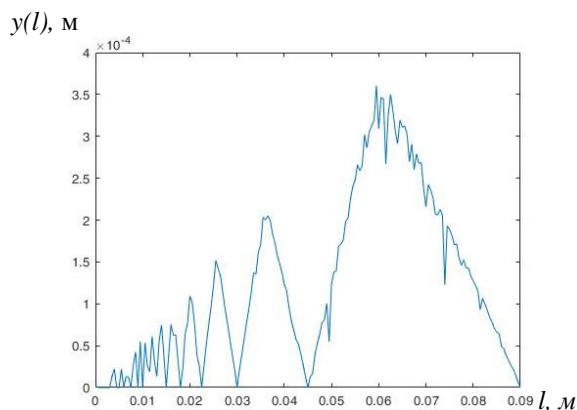


Рис. 6. Теоретическая зависимость $y(l)$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ СТРУН СТРУННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Целью эксперимента являлись: 1) установление фактической зависимости амплитуды колебаний струны СП различных типов от следующих параметров импульсов возбуждения колебаний струны: амплитуда F , длительности τ_u , длительности его фронтов τ_ϕ , точки приложения x_0 ; 2) сравнение метрологических параметров предложенных струнных преобразователей перемещения с переменной длиной струны с параметрами серийно выпускаемых струнных преобразователей. В процессе эксперимента решались следующие задачи.

1. Конкретизация проблемы (с привлечением различных источников).
2. Изучение связанной с ней литературы и практики.
3. Уточнение формулировок гипотез исследования.
4. Разработка плана.
5. Подготовка исходных данных.
6. Проведение эксперимента.
7. Формулирование выводов.
8. Обработка результатов эксперимента.

При проведении эксперимента использовались апробированные методики [21, 22], а сам эксперимент проводился на установке, состоящей из следующих приборов: генератора ГЗ-106, осциллографа С1-83, устройства для регистрации статических и динамических усилий и перемещений (УРСДУП), в котором реализованы технические решения по патенту 2728245 РФ [27], специализированного периодомера (ПЦП-1), анализатора спектра сигнала R&S FSUP50 (диапазон частот – от 20 Гц до 50 ГГц). Амплитуда колебаний струны контролировалась с помощью измерительной лупы Veber 7175. Все приборы прошли метрологическую поверку в ФГУП «ВНИИМС» (ООО «Метэк» 15.12.2022).

Параметры импульса возбуждения УРСДУП с плавной регулировкой длительности импульса возбуждения τ_u , длительности фронта τ_ϕ , напряжения и периода следования были следующие: напряжение 50–170 В; длительность $\tau_u = 0,125 \div 0,575$ мс; длительность $\tau_\phi = 0,00 \div 0,01$ мс; период следования T_0 – не менее 4 с. Экспериментальная установка обеспечивала генерацию очередного импульса возбуждения в условиях, когда струна находится в состоянии покоя, т. е. период следования импульсов возбуждения T_0 превышает время T^* затухания амплитуды u до пренебрежительно малой величины u_{\min} (см. рис. 1), другими словами, соблюдается неравенство $T_0 > T^*$ (см. рис. 2,а).

В качестве исследуемого СП был выбран опытный образец струнного преобразователя перемещений (см. рис. б), выполненного с учетом технических решений, предложенных авторами в патентах [18–20], и обладающего следующими параметрами: силой натяжения струны $F = 21,0$ Н; длиной (длиной рабочих участков) струны $l_i = 10$ см; диаметром резонатора $d_c = 0,2$ мм; зазором между струной преобразователя и керном ЭКВ $\delta_0^k = 0,5$ мм, а также серийно выпускаемые СП ПСАС-40, ГД-4 и АД-40 (рис. 7). Эксперимент проводился в три этапа:

первый этап: при постоянных значениях длительности импульса возбуждения τ_u , длительности фронта τ_ϕ и напряжении импульса силы в диапазоне от 50 до 150 В с шагом 10 В;

второй этап: при постоянных значениях напряжения импульса силы 120 В, длительности импульса возбуждения τ_u в диапазоне 0,125–0,575 мс с шагом 0,025 мс и длительности τ_ϕ 0,0001 с;

третий этап: при постоянных значениях напряжения импульса силы 120 В, длительности импульса возбуждения τ_u 0,525 мс и длительности τ_ϕ в диапазоне 0,000–0,001 с шагом 0,00001 с.

Результаты эксперимента представлены на рис. 8–16.

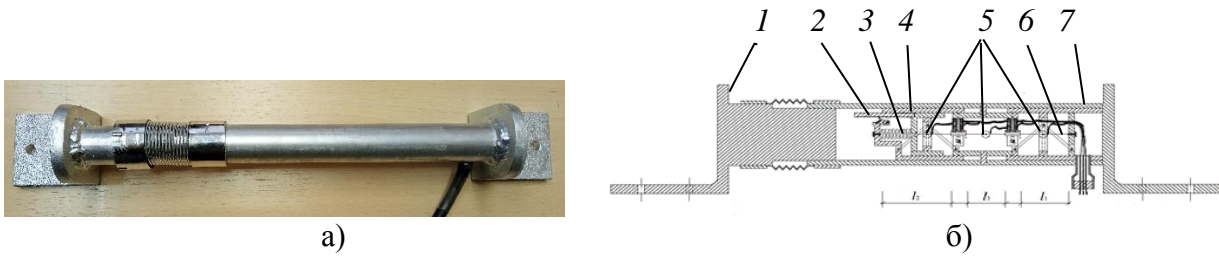


Рис. 6. Опытный образец струнного преобразователя перемещений с переменной длиной струны:

а – общий вид; б – конструктивная схема: 1 – подвижный элемент; 2 – храповой механизм; 3 – пружина; 4 – подвижный элемент; 5 – электромагнитная катушка возбуждения; 6 – струнный резонатор; 7 – корпус преобразователя

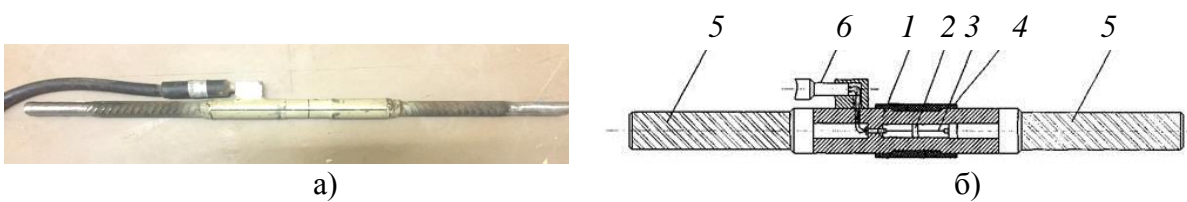


Рис. 7. Серийно выпускаемый СП ПСАС-40:

а – общий вид; б – конструктивная схема: 1 – корпус (упругий элемент); 2 – электромагнитная катушка возбуждения; 3 – струнный резонатор; 4 – чехол, предохраняющий его от сцепления с бетоном; 5 – удлинитель; 6 – узел ввода кабеля

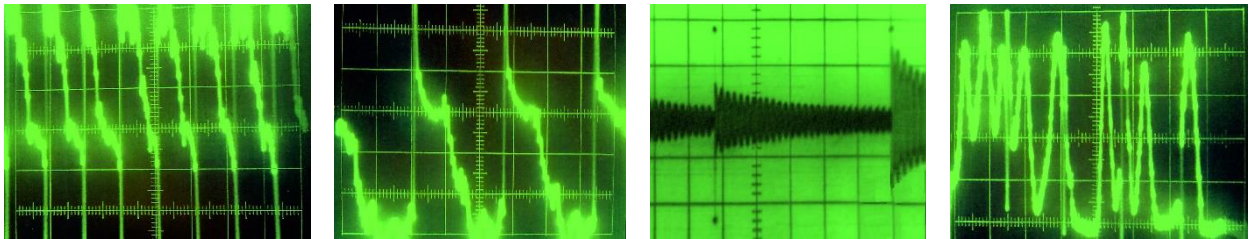


Рис. 8. Результаты эксперимента: влияние амплитуды импульса возбуждения на отклик струнного резонатора при $y > \delta_0^k$ (соударение струны с керном ЭКВ и утрата синусоидальной формы ее колебания)

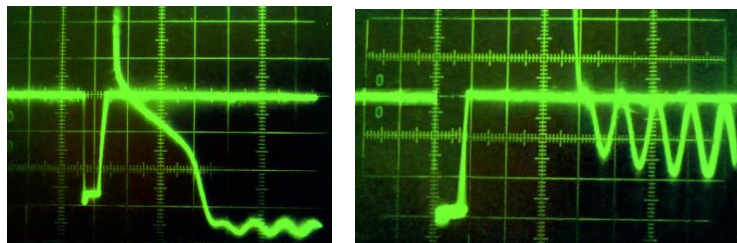


Рис. 9. Результаты эксперимента: влияние длительности импульса возбуждения τ_u на отклик струнного резонатора при $y < \delta_0^k$ и $T^* < T^0$. Амплитуда колебаний растет с увеличением длительности импульса возбуждения τ_u

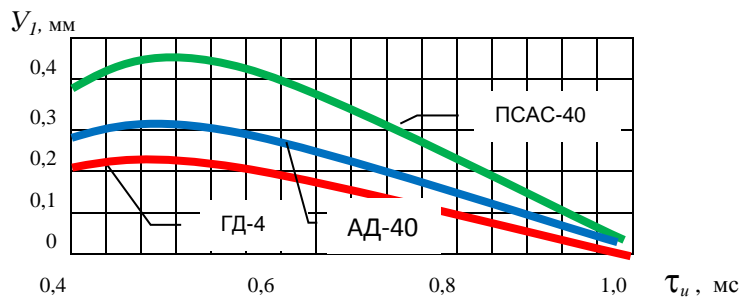


Рис. 10. Результаты эксперимента: влияние длительности импульса возбуждения τ_u на амплитуду струнного резонатора при $y < \delta_0^k$ и $T^* > T^0$

В процессе эксперимента установлено, что для подавляющего большинства СП при $y < \delta_0^k$ и $T^* > T^0$ амплитуды максимальных значений высших гармоник не имеют постоянных абсолютных значений при постоянстве значений длительностей импульсов возбуждения τ_u , что приводит к погрешности измерения информативного параметра СП (частоты колебаний струны).

В процессе эксперимента установлена устойчивая обратно пропорциональная зависимость амплитуд высших гармоник от их номера как для СП с постоянной силой натяжения и переменной длиной струны, так и для СП с постоянной длиной струны.

Вместе с тем для оценки влияния высших гармоник на помехозащищенность СП необходимо учитывать тот факт, что амплитуда колебаний струны при импульсном способе возбуждения во времени имеет затухающий характер, что обусловлено наличием декремента затухания.

Характер затухания струн выпускаемых отечественных СП представлен на рис. 11. При этом установлено, что скорость затухания колебаний гармоник тем выше, чем больше их номер (на рис. 11 – для $n = 1$ и рис. 12 – для $n = 3$).

Из факта превышение скорости затухания высших гармоник скорости первой гармоники следует рекомендация о необходимости задержки момента начала измерения информативного параметра СП на время затухания высших гармоник до значения, обеспечивающего требуемую точность измерения.

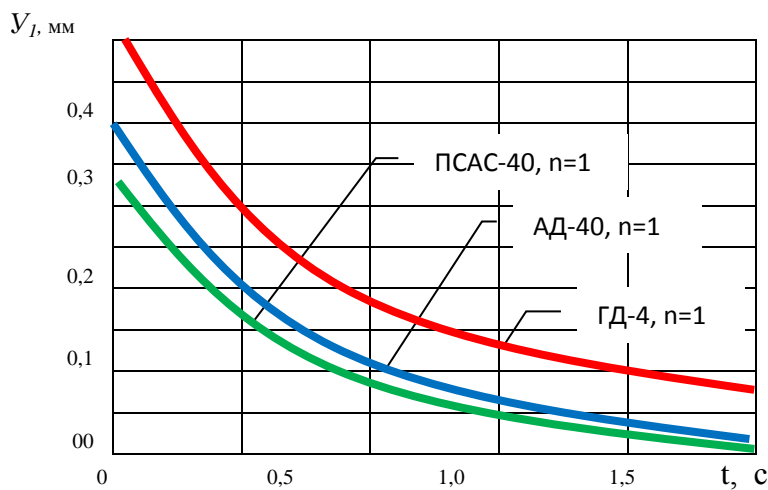


Рис. 11. Результаты эксперимента: затухание амплитуды колебания первой гармоники

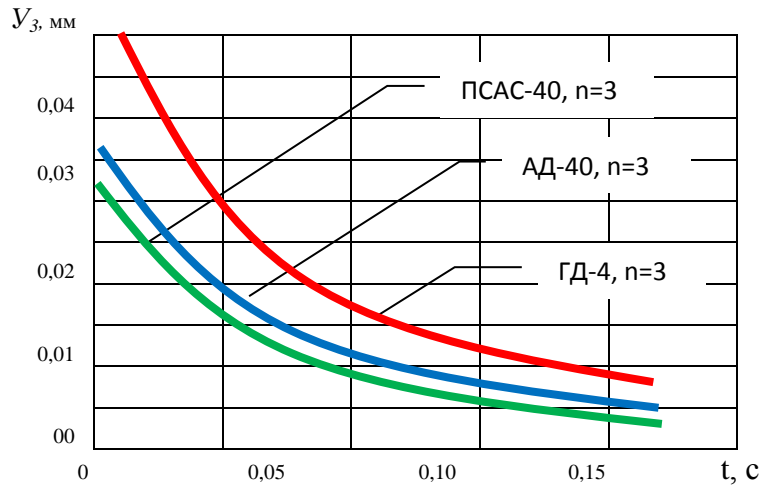


Рис. 12. Результаты эксперимента: затухание амплитуды колебания третьей гармоники СП ПСАС-40, АД40, ГД-4

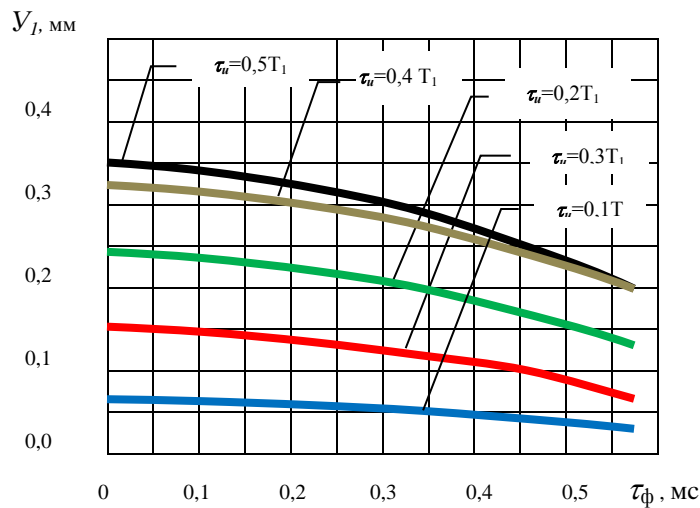
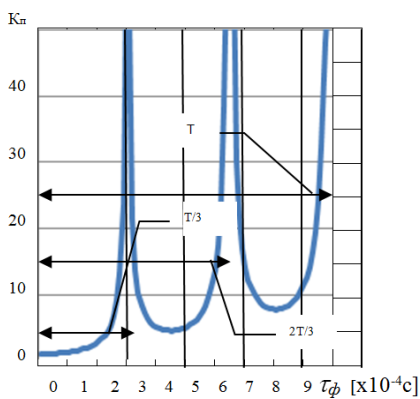
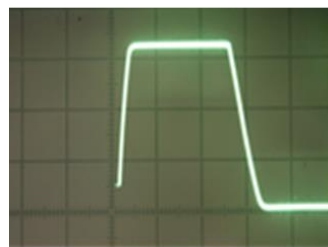


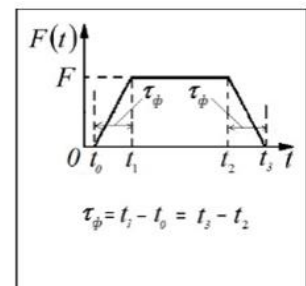
Рис. 13. Экспериментальные зависимости амплитуды у первой гармоники ($n = 1$) от τ_ϕ импульса возбуждения при различных значениях τ_u и при $y < \delta_0^k$ и $T^* > T^0$ для СП СПАС-40



а)

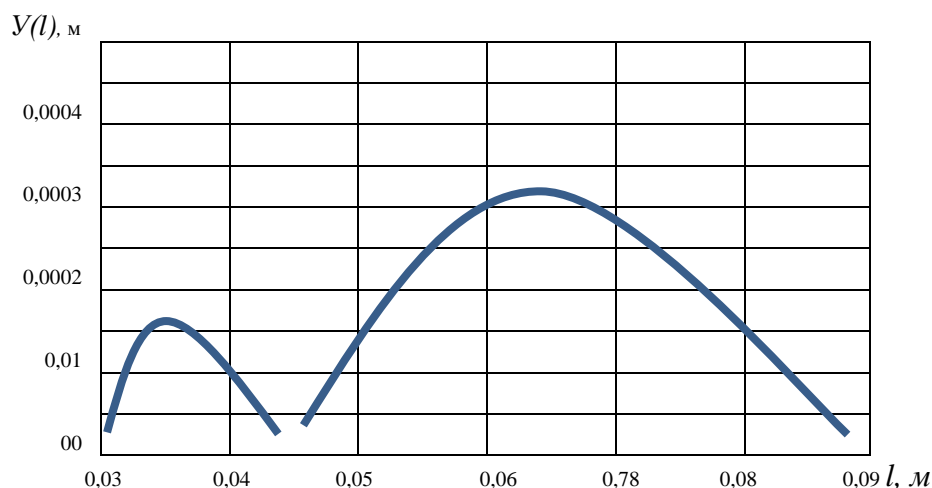


б)



в)

Рис. 14. Результаты эксперимента:
 а – экспериментальная зависимость $K_{\Pi}(\tau_\phi)$ для третьей гармоники при $y < \delta_0^k$ и $T^* > T^0$;
 б – параметры импульса возбуждения трапецидальной формы;
 в – форма импульса возбуждения



15. Экспериментальная зависимость $y(l)$ для опытного образца струнного преобразователя перемещений с переменной длиной струны при длительности $\tau_u = 0,1$ мс

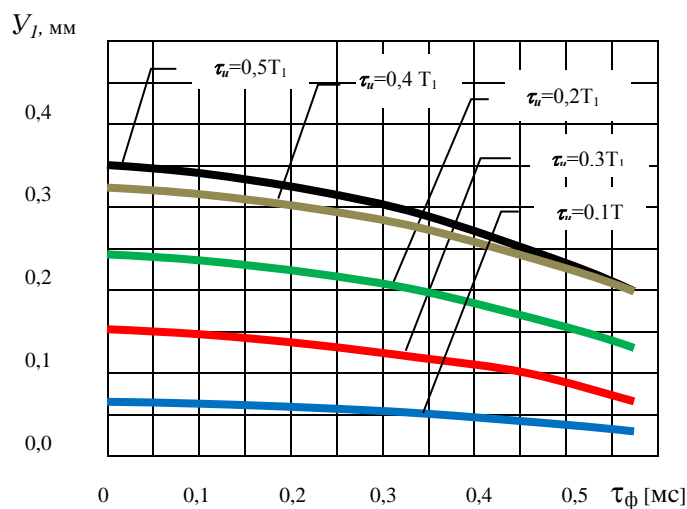


Рис. 16. Экспериментальные зависимости амплитуды y первой гармоники ($n = 1$) от τ_ϕ импульса возбуждения при различных значениях τ_u и $y < \delta_0^k$ и $T^* > T^0$ для опытного образца струнного преобразователя перемещений с переменной длиной струны

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Анализ результатов отечественных [9, 13, 17, 23–25] и зарубежных [6–8] исследований в области возбуждения колебаний струны СП показал:

– в мировой практике в подавляющем большинстве случаев используются СП первого типа (с постоянной длиной струны) с импульсным способом возбуждения колебаний, что сужает пределы измерений параметров НДС конструкций;

– ограничение в использовании второго типа СП (с переменной длиной струны) связаны главным образом со сложностью обеспечения постоянства пространственного положения ЭКВ относительно центра струны; сведения о СП второго типа имеются только в патентах;

– предложенные авторами решения позволяют расширить диапазон измерения перемещений в десятки раз за счет введения в конструкции СП подвижных элементов, обеспечивающих непрерывное центрирование ЭКВ относительно центра струны и механическое запоминание максимальных значений измеряемых перемещений, имевших место за весь период эксплуатации объекта.

2. Результаты эксперимента с СП второго типа показали, что за счет обеспечения равенства $x_0 = x = l/2$ можно техническими средствами удерживать амплитуду колебаний струны в пределах $y_{\max} > y > y_{\min}$ и выполнять условие $y < \delta_0^k$, что автоматически обеспечивает относительную погрешность измерения не выше 1,6–1,7% (от диапазона измерения), СП первого типа обеспечивают относительную погрешность 2,0% (ТУ 43-28-10338-89, а также ТУ 4218-003-00113543-09).

3. Анализ данных, полученных в ходе проведенных исследований, свидетельствует о близкой сходимости экспериментальных и теоретических результатов (см. рис. 4 и 10; рис. 5,а и 14,а).

Отдельные экспериментальные результаты отличаются от теоретических (например, значения y_i на 5–7% ниже теоретических значений), что наблюдается на определенных интервалах варьируемых в ходе эксперимента параметров (см. рис. 6 и 15). Авторы объясняют указанные отклонения экспериментальных данных от теоретических влиянием следующих факторов:

– прецессией колебания струны [23] (явление, при котором ось вращения тела меняет свое направление в пространстве и вызывает нутацию), которая вносила искажение при оценке амплитуд колебаний гармоник, так как в эксперименте измерялась амплитуда наведенной ЭДС в ЭКВ, а не непосредственно амплитуды колебаний струны, наводящих эту ЭДС;

- наличием «эффекта последствия» [2] в начальный период затухания колебаний;
- несимметричностью формы импульса возбуждения, при которой длительности переднего и заднего фронтов импульса не равны [25] (см. рис. 14,б);
- демпфированием колебания струны ЭКВ [9];
- непостоянством скорости затухания колебаний гармоник [26].

4. Решение задач по устранению или снижению влияния перечисленных в пункте 3 факторов позволит снизить погрешность измерения параметров НДС зданий и сооружений и одновременно повысить помехоустойчивость СМ и тем самым расширить область применения СП с переменной длиной струны и импульсным способом возбуждения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных исследований позволяют сформулировать направления дальнейших исследований и сделать следующие выводы:

1. Отклик струнного резонатора СП первого и второго типов на импульс возбуждения, а следовательно, помехоустойчивость и погрешность СМ, зависят от параметров импульсов возбуждения: длительности τ_n , длительности его фронтов τ_f , и амплитуды F , фазы θ , точки приложения x_0 и периода следования T^0 . Вклад каждого из перечисленных параметров зависит от соотношения времени полного затухания струны T^* и периода генерации очередного импульса возбуждения T^0 . При режиме возбуждения с $T^* < T^0$ вклад параметров F и фазы θ незначителен по сравнению с их вкладами в режиме возбуждения с $T^* > T^0$.

2. Дальнейшие исследования в данной области целесообразно проводить в направлении изучения эффекта прецессии колебания струны, флуктуации скорости затухания колебаний гармоник, неравенства переднего и заднего фронтов импульса возбуждения, а также влияния положения ЭКВ относительно центра струны.

Список используемых источников

1. Бернд Х., Сухов И. В., Ли В. Т. Автоматизированная система деформационного мониторинга (АСДМ) на Саяно-Шушенской ГЭС // Гидротехника. – 2015. – № 2. – С. 12–15.
2. Гусев Н. Н. Методика создания и эксплуатации информационной системы мониторинга безопасности зданий и сооружений опасных производственных объектов и гидротехнических сооружений: автореф. дис. д-ра техн. наук. – СПб. : Санкт-Петербургский ун-т гос. противопожарной службы МЧС России, 2008. – 48 с.
3. Гусев Н. Н., Кучеренко А. О. Особенности оценки технического состояния несущих конструкций специальных сооружений при особых нагрузках и воздействиях // Специальные сооружения и объекты: актуальные проблемы изысканий, строительства и эксплуатации : сб. науч. тр. участников межвузовск. научно-практич. конф. 25 апреля 2019 г. / ВИ(ИТ) ВА МТО им. генерала армии А. В. Хрулёва. – СПб. : ВИ(ИТ) ВА МТО, 2019. – С. 152–156.
4. Гусев Н. Н., Кучеренко А. О. Адаптация систем испытаний и долговременного контроля к условиям аварийных ситуаций на стартовых сооружениях наземной космической инфраструктуры // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 663. – С. 71–75.
5. Гусев Н. Н., Кучеренко А. О. Работоспособность систем мониторинга специальных сооружений при изменении параметров кабельной сети // Вопросы оборонной техники. Сер. 16 : Технические средства противодействия терроризму : научно-техн. жур. – 2019. – Вып. 133/134. – С. 142–149.
6. Allen M., Mayes M., Bergman E. Experimental modal substructuring to couple and uncouple substructures with flexible fixtures and multi-point connections // Journal of Sound and Vibration. – 2010. – № 329. – P. 4891–4906.
7. Jang J., Smyth A. Model updating of a full-scale FE model with nonlinear constraint equations and sensitivity-based cluster analysis for updating parameters // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2017. – № 83. – P. 337–355.
8. Sarsri D., Azrar L. Dynamic analysis of large structures with uncertain parameters based on coupling component mode synthesis and perturbation method // Ain Shams Engineering Journal. – 2016. – № 7. – P. 371–381.
9. Проектирование датчиков для измерения механических величин / под ред. Е. П. Осадчего. – М. : Машиностроение, 1979. – 480 с.
10. Соколова Н. Н. Датчики следят за безопасностью // Мониторинг как залог спокойствия. – 2006. – № 88. – С. 118–129.
11. Гусев Н. Н. Методы восстановления работоспособности системы мониторинга безопасности зданий и сооружений опасных производственных объектов и гидротехнических сооружений // Актуальные проблемы защиты населения и территорий от пожаров и катастроф : мат. Междунар. научно-практич. конф. Санкт-Петербург, 21 июня 2006 г. – СПб. : СПбУ ГПС МЧС России, 2006. – С. 54–63.
12. Gusev N., Kucherenko A., Mandritsa D. The level of accuracy of generation moment determination of impulse excitation of the string converter and its impulse on the information and measuring systems and their ability to work // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – 2018. – 3-4 Oct. – URL: <https://doi.org/10.1109/FarEastCon.2018.8602774> (дата обращения: 19.05.2023).
13. Gusev N., Svatovskaya L., Kucherenko A. Effect of changing of the parameters of the cable network of monitoring systems of high-rise buildings on the basis of string converters on their operability // Megacities and tall buildings, E3S Web of Conferences 33, 02069. – 2018. – URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183302069> (дата обращения: 19.05.2023).
14. Савельев И. В. Курс общей физики. – СПб. : Лань, 2016. – Т. 1. – 436 с.

15. *Зиновьев Р. К.* Модернизация струнных средств измерений для мониторинга безопасности энергетических сооружений // Вестник РУДН. Сер. : Инженерные исследования. – 2005. – № 2 (12). – С. 64–66.
16. *Пановко Я. Г.* Основы прикладной теории колебаний и удара. – М. : Либроком, 2015. – 274 с.
17. *Гусев Н. Н., Кучеренко А. О.* Работоспособность систем мониторинга специальных сооружений при изменении параметров кабельной сети // Вопросы оборонной техники. Сер. 16 : Технические средства противодействия терроризму. – 2019. – № 7/8 (133/134). – С. 142–149.
18. Пат. 2685803 РФ: МПК G01L 1/10 (2006/01). Датчик перемещения / Гусев Н. Н., Кучеренко А. О.; заявители и патентообладатели: Гусев Н. Н., Кучеренко А. О. – № 2017144153/28; заявл. 15.12.2017; опубл. 23.04.2019, Бюл. № 12. – 3 с.
19. Пат. 2777515 РФ: МПК G01L 1/106 (2022/05). Датчик перемещения / Гусев Н. Н., Кучеренко А. О., Маслов В. О., Сычева А. М., Абу-Хасан Махмуд; заявитель и патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I». – № 2021134478; заявл. 24.11.2021.; опубл. 05.08.2022, Бюл. № 22. – 5 с.
20. Пат. 2794285 Рос. Федерация : МПК G01L 1/10 (2006/01). Струнный преобразователь перемещений / Маслов В. О., Кучеренко А. О., Добрышкин Е. О., Куницын Я. А., Осмоловский С. Л.; заявители и патентообладатели: Маслов В. О., Кучеренко А. О., Добрышкин Е. О., Куницын Я. А., Осмоловский С. Л. – № 2022119522; заявл. 15.12.17; опубл. 15.07.22, Бюл. № 24. – 3 с.
21. Р РСК 002-06. Основные требования к методикам калибровки, применяемым в Российской системе калибровки. – М. : ФГУП «ВНИИМС», 2006. – 20 с.
22. СТО 70238424.27.140.025-2009. Гидроэлектростанции. Контрольно-измерительные системы и аппаратура гидротехнических сооружений. Метрологическое обеспечение и оценка технического состояния и работоспособности. Нормы и требования. – М. : НП «ИНВЭЛ», 2009. – 29 с.
23. *Вульфсон И. И.* Краткий курс теории механических колебаний. – М. : ВНТР, 2017. – 241 с.
24. *Gusev N., Svatovskaya L., Kucherenko A.* Effect of changing of the parameters of the cable network of monitoring systems of high-rise buildings on the basis of string converters on their operability // E3S Web of Conferences. – 2017. – P. 162–171. – URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183302069> (дата обращения: 19.05.2023).
25. *Gusev N.* The level of accuracy of generation moment determination of impulse excitation of the string converter and its impulse on the information and measuring systems and their ability to work // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – 2018. – 3-4 Oct. – URL: <https://doi.org/10.1109/FarEastCon.2018.8602774> (дата обращения: 19.05.2023).
26. *Бернс В. А.* Погрешности определения характеристик собственных тонов при близких собственных частотах // Контроль, диагностика. – 2011. – № 3 (153). – С. 12–16.
27. Пат. 2728245 РФ: МПК G01L 1/10 (2020/02). Устройство для возбуждения непрерывных колебаний струны / Гусев Н. Н., Кучеренко А. О., Бирюков А. Н.; заявитель и патентообладатель: Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулёва» МО РФ. – № 2020107643; заявл. 18.12.2020.; опубл. 28.07.2020, Бюл. № 22. – 3 с.

Ю. А. Каменев,
кандидат технических наук;
С. С. Рябова;
А. С. Соломахин,
кандидат технических наук, доцент;
А. М. Сычева,
доктор технических наук, профессор

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ И ДЕФОРМАТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЖАРСТОЙКОГО ПЕНОБЕТОНА ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

В работе рассмотрена возможность применения жаростойкого фибропенобетона в качестве жаростойкого материала в конструкции газохода стартового сооружения. Представлены значения диаграммы деформирования образцов жаростойкого пенобетона на основе фиброволокна при повышении температуры до 400^oC. Доказано отсутствие разрушений разработанного материала от воздействия продуктов сгорания жидкостно-ракетный двигатель (ЖРД), имитирующего газодинамическое воздействие от старта ракеты.

Ключевые слова: жаростойкий пенобетон, специальное строительство, деформативные свойства, газоход, стартовое сооружение, теплозащитный материал, базальтовая фибра, газодинамическое воздействие.

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире повышается актуальность применения ячеистых жаростойких материалов для конструкций, работающих в условиях высокого температурного. Ячеистые бетоны отличаются тем, что пористая структура достигается введением в цементно-песчаный раствор отдельно приготовленной строительной пены (пенобетона) или специализированных газообразователей (газобетона). Такие материалы с заданными свойствами находят применение в качестве жаростойкого материала в ограждающих конструкциях агрегатов атомной энергетики. Они предназначены для снижения теплового воздействия и демпфирования нагрузок, возникающих при температурном расширении металлоконструкции, а также для футеровок печей в гражданской промышленности.

Актуальность темы исследования связана с необходимостью разработки новых современных жаростойких материалов для работы в условиях высокотемпературного нагрева не только в гражданском, но и в специальном строительстве. Известно, что газоход стартового сооружения предназначен для отвода газодинамической струи при пуске ракеты космического назначения (РКН) и подвергается высоким газодинамическим нагрузкам. В ходе проведенного анализа [1], установлено, что реальная температура вследствие газодинамического воздействия на поверхности газохода составляет не более 300^oC (рис. 1). Температура (с учетом водоохлаждения) измерялась с помощью температурных датчиков (комплекс автоматизированных систем управления 14И141), установленных на время пуска (29 апреля 2022 года) ракеты-носителя тяжелого класса «Ангара-А5» (воинская часть 13973).

Зона А соответствует той зоне конструкции газохода, которая покрыта металлооблицовкой, а зона Б (периферийная) – той зоне конструкции газохода, которая покрыта плитами из жаростойкого бетона (рис. 1). Применяемые материалы в процессе эксплуатации значительно деградируют (рис. 2).

Известно, что одной из характеристик долговечности жаростойких материалов является их высокая деформативность [2]. На сегодняшний день существует необходимость разработки новых современных материалов с повышенными деформативными свойствами для применения в конструкциях газоходов стартовых сооружений, которые находятся в условиях

высоких газодинамических и температурных воздействий. Пенобетон является деформативным материалом за счет своей пористой структуры, которая создается введением отдельно приготовленной строительной пены [3].

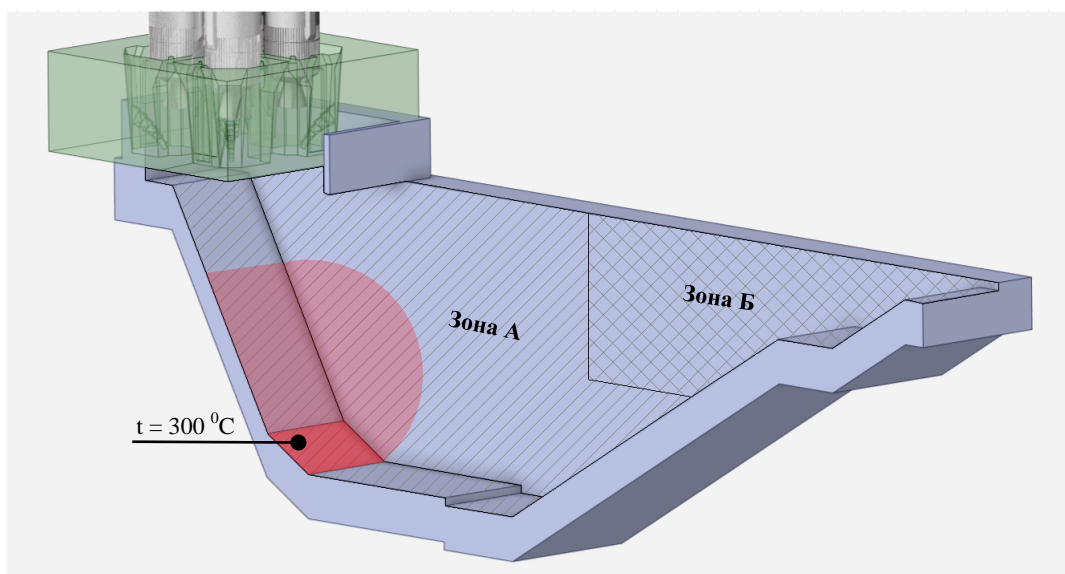


Рис. 1. Схема газохода УСК РКК «Ангара»

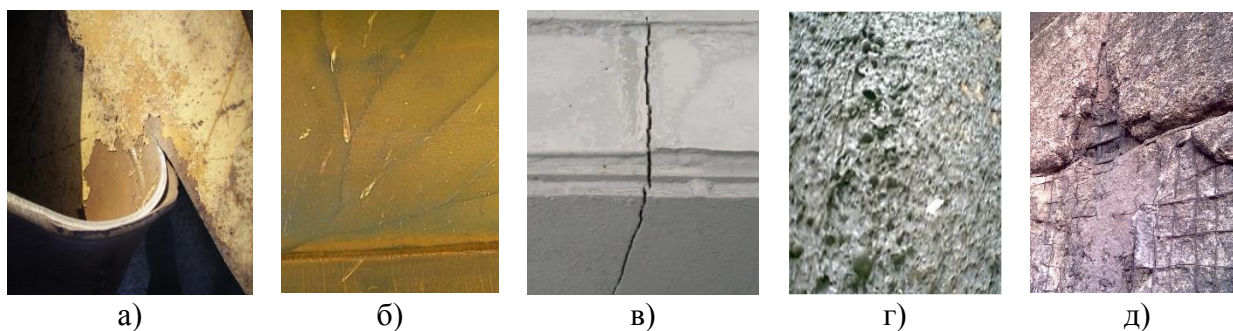


Рис. 2. Дegradaция жаростойких материалов конструкции газохода:
 а – вырывание листа металлооблицовки; б – трещины металла; в – трещина бетона;
 г – оплавление бетона; д – выкрашивание бетона

Одним из способов повышения деформативности материала является введение в его состав фиброволокна. Фибра повышает как прочность при сжатии, так и прочность на растяжение при изгибе материала, повышает его трещиностойкость и, как следствие, долговечность. В работе для применения в условиях повышенных температур предложено использовать базальтовую фибру, устойчивую к воздействию высоких температур.

Базальтовую фибру получают плавлением шихты из расплава горной породы базальта. По химическому составу данные породы относятся к группе основных пород, для которых характерно невысокое содержание кремнезема (SiO_2). Базальт является перспективным материалом для использования в технологии изготовления пенобетонных изделий, а волокна на его основе обладают высокой прочностью при разрыве и высоким модулем упругости, имеют малую растяжимость, не горят, не гниют и обладают хорошей химической стойкостью [4]. Базальтовая фибра совместима с цементным тестом, имеет хорошую адгезию с цементным камнем, что обеспечивает высокую прочность бетона.

В работе было предположено введение фибры в состав жаростойкого пенобетона (ЖПБ), что обеспечит сохранение деформативных свойств материала при повышении температуры с учетом ее устойчивости к воздействиям повышенных температур.

Задача работы состояла в том, чтобы исследовать, как деформативность ЖПБ с заданными свойствами изменяется с повышением температуры до 400°C. Такая температура выбрана с запасом на 100°C в сравнении с реальной температурой поверхности материала конструкций газопроводов (300°C), измеренной при работе системы водного охлаждения. Марка пенобетона по средней плотности – D700 (700 кг/м³), класс по предельно допустимой температуре применения – И6 (600°C) в соответствии с ГОСТ 20910-2019 [5–7] и класс по прочности на сжатие – В1,5.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные исследования деформативных свойств ЖПБ при заданных температурах производились на образцах-кубах пенобетона размерами 100 x 100 x 100 мм после набора ими марочной прочности в течение 28 суток нормального твердения. Образцы были залиты при выпуске опытной партии ЖПБ в производственных условиях.

При выпуске опытно-промышленной партии ЖПБ использовались следующие материалы:

- портландцемент ЦЕМ II/A-Ш 32,5Н ООО «ПЕТЕРБУРГЦЕМЕНТ»;
- базальтовый порошок ООО «Карелминерал»;
- базальтовая фибра БС17-6.4(1/4")р-КВ-13 ООО «Базальтовые материалы»;
- пенообразователь на протеиновой основе *FoamCem*, производитель *Laston SPA*;
- стабилизатор для пенообразователя «КС-К» ООО «СИТЕК»;
- добавка для повышения удобоукладываемости «МС-ТехниФлоу 80» («МС-TechniFlow 80») ООО «Эм-Си Баухеми».

Построение диаграмм деформирования проводилось в соответствии с методической инструкцией «Определение прочности пенобетона на сжатие и соответствующих диаграмм деформирования σ - ε с ниспадающей ветвью при температурах 20°C, 100°C, 200°C, 300°C и 400°C, время выдержки образцов перед испытанием при каждой температуре – 4 часа».

Скорость нагрева образцов в муфеле составила 150°C/час.

Деформативные свойства исследовались при скорости нагружения пресса 1%/10 минут, при этом максимальное перемещение составило 15%.

В результате проведенного эксперимента при заданных температурах получены диаграммы σ - ε с нисходящей ветвью (рис. 4).

Прочностные и деформационные характеристики образцов ЖПБ, полученные в ходе испытания, приведены в табл. 1. Диаграммы деформирования представлены на рис. 3.

Таблица 1

Прочностные и деформационные характеристики образцов ЖПБ

№ п/п	Плотность, кг/м ³	t, °C	Предел прочности, МПа	Деформация при разрушении, %	Модуль упругости E _a ·10 ⁻³ , МПа	Общая потеря массы образцом по данным ДТА, Σm, мг
1	2	3	4	5	6	7
1	700	20	2,4	1,01	0,238	37,23
2		100	2,4	1,65	0,145	34,06
3		200	1,8	1,66	0,108	29,11
4		300	1,4	2,33	0,060	30,38
5		400	1,4	1,52	0,092	21,6

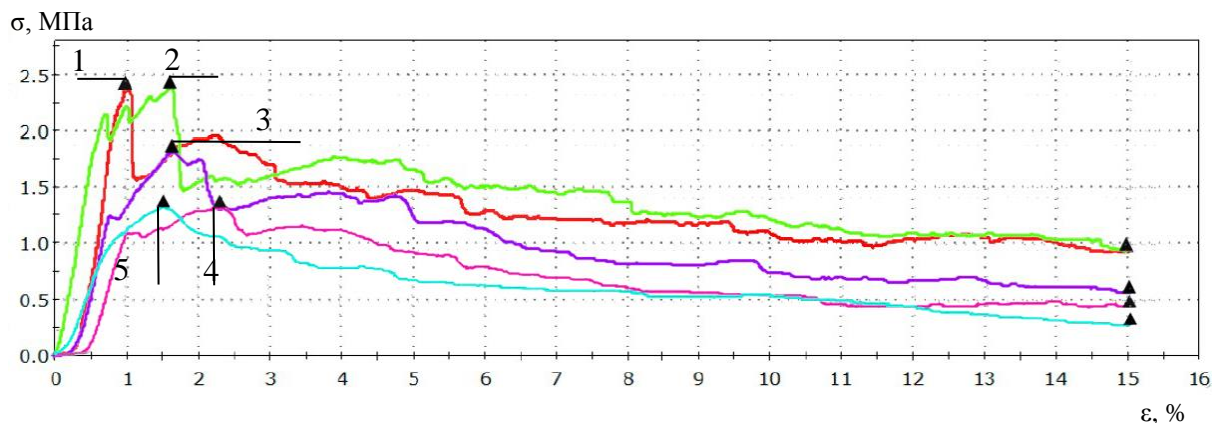


Рис. 3. Диаграмма деформирования σ - ε образцов ЖПБ при следующих температурах: 1 – 20°C, 2 – 100°C, 3 – 200°C, 4 – 300°C, 5 – 400°C

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Из рассмотрения табл. 1 и рис. 4 становится очевидным, что прочность с увеличением температуры с 20°C до 400°C снижается с 2,4 МПа до 1,8 МПа, т. е. снижается на 25%. Деформация, напротив, с ростом температуры до 300°C увеличивается с 1,01 до 2,33, т. е. более чем в 2 раза, а затем падает при повышении температуры до 400°C, но при этом она значительно выше чем при 20°C.

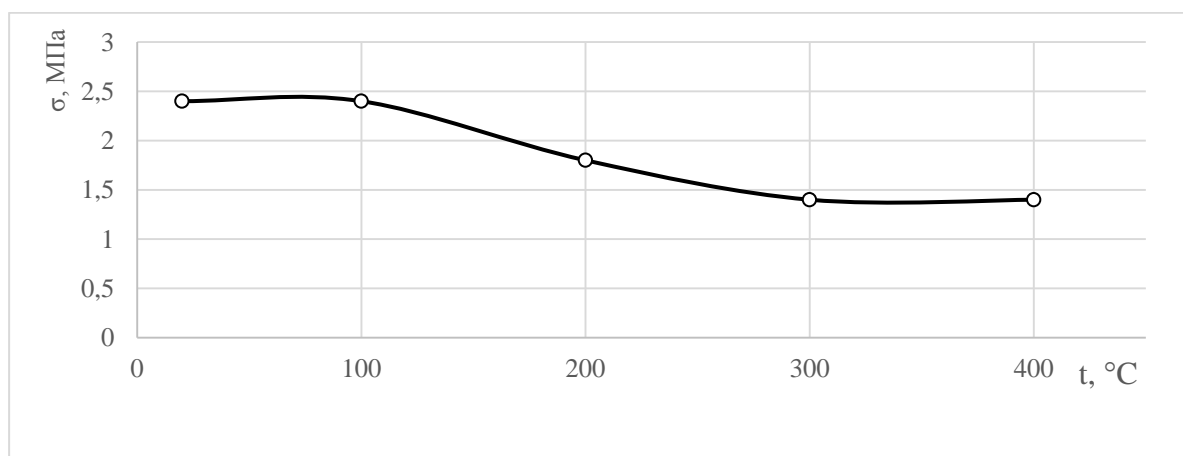


Рис. 4. Зависимость предела прочности от температуры

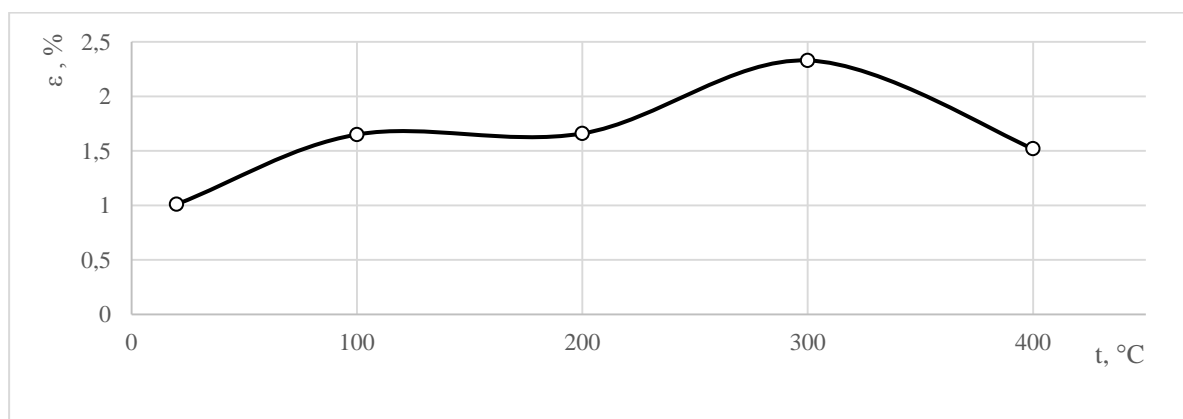


Рис. 5. Зависимость относительной деформации при разрушении от температуры

Главной причиной увеличения (в %) деформации с ростом температуры, вероятно, связано с включением в состав ЖПБ базальтовой фибры, которая удерживает материал при разрушении с ростом температуры (рис. 5).

Второй причиной увеличения деформации может быть увеличение пористости пенобетона, которая возникает в результате удаления химически связанной воды (рис. 6, табл. 1, графа 7), что подтверждают дериватограммы образцов после прогрева при температурах 100°C, 200°C, 300°C, 400°C.

Дериватографический метод анализа заключается в фиксации количества воды (в мг), теряемой образцом при медленном нагреве. Это, как правило, химически связанная вода затвердевшего цементного камня.

С ростом температуры обработки образцов в муфеле до 400°C прочность при сжатии образцов падает, что подтверждается снижением количества теряемой воды образцом при дериватографическом анализе – она уже удалась при нагреве в муфеле и обеспечила увеличение пористости образцов. Это, в свою очередь, вызвало увеличение деформативности.

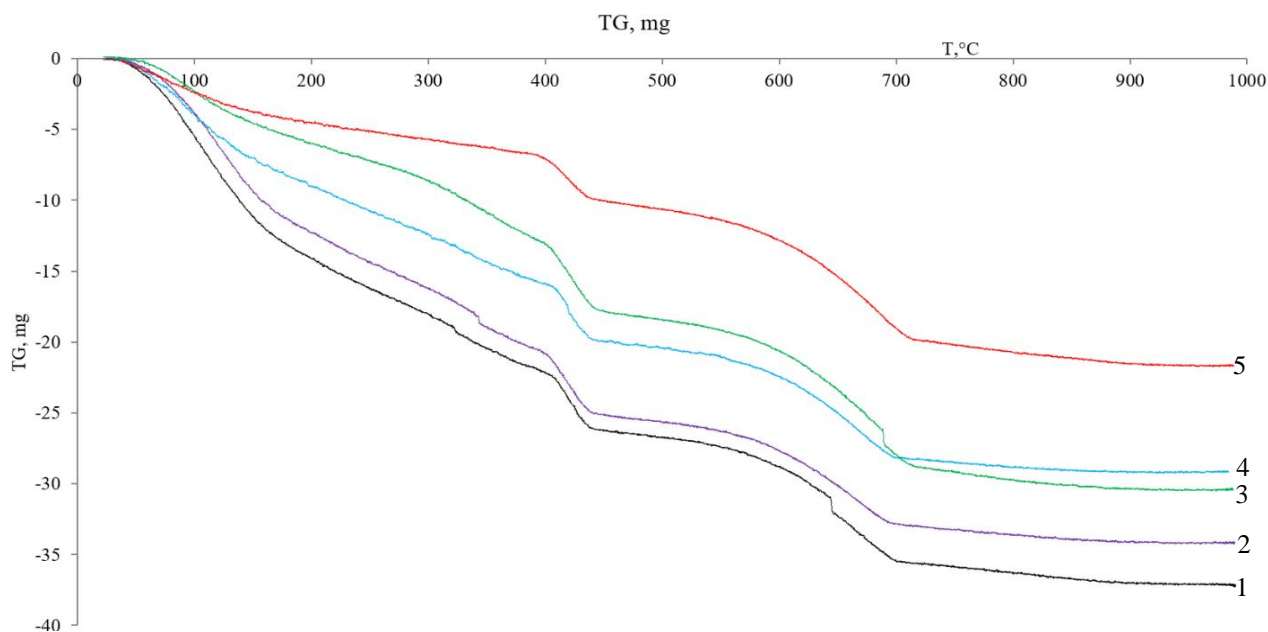


Рис. 6. Дериватограмма образцов ЖПБ при различных температурах.

С целью разработки новых технических решений были проведены экспериментальные исследования разработанного состава ЖПБ на лабораторной установке «Исследование и характеристики камеры ЖРД» ВКА имени А. Ф. Можайского. Задача эксперимента состояла в моделировании газодинамического воздействия при старте РН на образцы ЖПБ размером 70 x 70 x 70. Образцы были установлены на расстояние от среза сопла 720 мм (рис. 7).

Такое расстояние выбрано для обеспечения реальной температуры в газоходе при старте РКН. Температура выбрана с запасом в 2 раза (600°C) в сравнении с реальной температурой поверхности материала конструкций газоходов (300°C). В ходе эксперимента было смоделировано 10 пусков продолжительностью 10 с, что выбрано исходя из условия приближения тепловой нагрузки к уровню ее натуральных значений от воздействия при старте ракеты.

В результате эксперимента было установлено, что образцы ЖПБ выдержали газодинамическое и температурное воздействие струи продуктов сгорания ЖРД без разрушений. На рис. 8 показан образец, установленный в центральном положении после 1-го (рис. 8,а) и 10-го включений двигателя ЖРД (рис. 8,б). На образце отсутствуют видимые трещины, выбоины и унос (абляция) материала. Грани образца после 10-го включения двигателя ЖРД сохранили свою конфигурацию, что подтверждает – сколы отсутствуют.

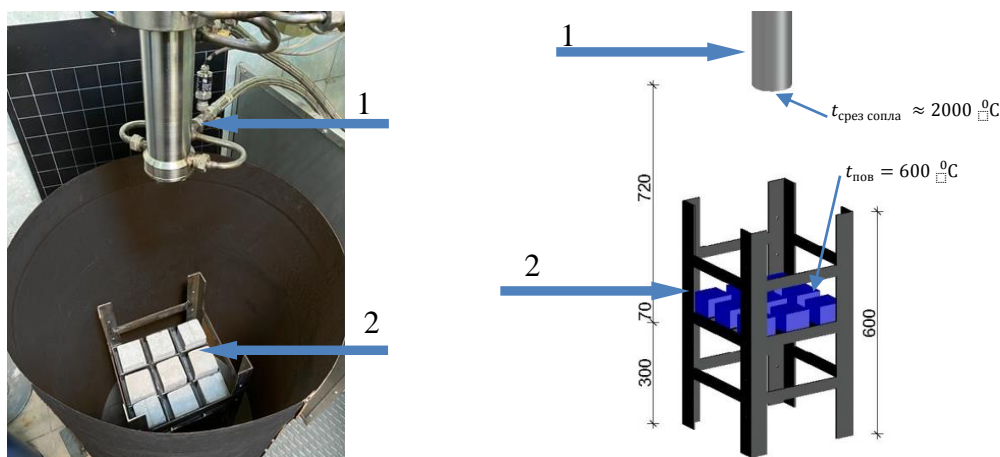


Рис. 7. Положение образцов ЖПБ при испытаниях:
1 – камера ЖРД; 2 – образцы ЖПБ

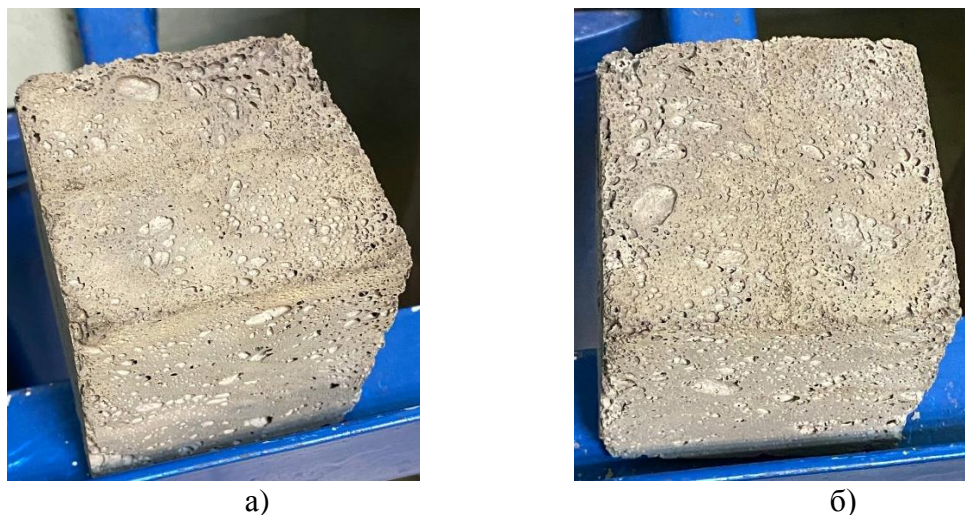


Рис. 8. Фото образца ЖПБ после 1-го пуска (а) и после 10-го пуска (б)

Таким образом, предложенный состав ЖПБ с включением в состав фиброволокна удовлетворяет требованиям, предъявляемым к жаростойким материалам для применения в качестве жаростойкого материала в конструкции газохода стартового сооружения. Разработанный состав имеет повышенную долговечность и позволит увеличить количество пусков РКН минимум до 10, без проведения ремонтно-восстановительных работ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате проведенных исследований при различных температурах были получены диаграммы деформирования образцов жаростойкого пенобетона.

2. Предположительно заменив в конструкции газохода металлооблицовку в зоне А и в зоне Б (см. рис. 1) на разработанный жаростойкий пенобетон с заданными свойствами (D700, И6, В1,5) и повышенной деформативностью, пенобетон сможет воспринять на себя динамическую и температурную нагрузки без разрушения. В результате такое техническое решение увеличит долговечность стартового сооружения от пуска к пуску.

3. Натурный эксперимент, имитирующий газодинамическое воздействие от старта РКН, показал, что образцы жаростойкого пенобетона выдержали 10 пусков без разрушения и уноса. Включение базальтовой фибры в состав обеспечивает не только его хорошие деформативные свойства, но и отсутствие уноса с поверхности материала, поскольку хорошее распределение фибры в смеси способствует укреплению поверхности материала.

4. Жаростойкий фибропенобетон имеет пониженную удельную стоимость по сравнению с металлооблицовкой, что делает его экономически более эффективным.

Список используемых источников

1. Отчет по функционированию системы измерения параметров технологического оборудования (СИП ТО) 14 и 029, при проведении пуска РН 14А127 27.12.2021. – г. Мирный, 2022. – 12 с.

2. Технические решения с применением жаростойкого пенобетона для конструкций газозахода универсального стартового комплекса космического ракетного комплекса «Ангара» / А. М. Сычева [и др.] // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2021. – Вып. 681. – С. 141–146.

3. Жаростойкие пенобетоны : моногр. / В. А. Береговой [и др.]. – Пенза : ПГУАС, 2007. – 112 с.

4. *Стешенко А. Б., Кудряков А. И.* Управление технологическими процессами для обеспечения качества пенобетона неавтоклавно твердения : учеб. пособие. – Томск : Изд-во Томского архит.-строит. ун-та, 2021. – 156 с.

5. *Сычева А. М., Рябова С. С., Янчук М. А.* Исследование осевого растяжения фибропенобетона различных технологий получения // Специальные сооружения и объекты: актуальные проблемы изысканий, строительства и эксплуатации : сб. науч. тр. участников межвузов. научно-практич. конф. / под ред. М. М. Галушко. – СПб. : ВИ(ИТ) ВА МТО, 2022. – С. 96–104.

6. *Некрасов К. Д., Тарасова А. П.* Жаростойкий бетон на портландцементе. – М. : Стройиздат, 1969. – 190 с.

7. ГОСТ 20910-2019. Бетоны жаростойкие. Технические условия. – М. : Стандартинформ, 2019. – 6 с.

Т. Н. Солдатенко,
кандидат технических наук;
Е. А. Тюрин,
кандидат технических наук, доцент

МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ УРОВНЯ РИСКА АВАРИИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ КОНСТРУКЦИИ СТАРТОВОГО СООРУЖЕНИЯ ПО ПОСТОЯННОЙ ИЗНОСА

Представлена методика оценивания уровня риска аварии железобетонной конструкции стартового сооружения на основе идентификации категории технического состояния, в котором находится конструкция за заданное время эксплуатации. Получение оценки такого показателя базируется на результатах ранее проведенного обследования. Полученные результаты проиллюстрированы расчетным примером.

Ключевые слова: уровень риска, железобетонная конструкция, индекс надежности, постоянная износа.

ВВЕДЕНИЕ

При подготовке стартового сооружения к применению при запуске ракеты космического назначения с космическим аппаратом (КА) необходимо знание категорий технического состояния (ТС) его железобетонных конструкций (ЖБК). Для решения этой задачи затрачиваются значительные ресурсы (время, материальные и трудовые ресурсы) [1]. Категории ТС ЖБК стартового сооружения определяют необходимые воздействия на них для обеспечения приемлемого риска запуска КА [2]. Во многих работах рассматриваются различные подходы к решению задачи оценивания времени безопасной эксплуатации сооружений, а также рисков их аварий при эксплуатации [3–7].

При выполнении орбитальных группировок возможны ситуации, когда существенно сокращаются ресурсы для подготовки стартового сооружения. Тогда чрезвычайно важно решить задачу, обратную к указанной: необходимо определить категорию технического состояния ЖБК за известное время эксплуатации и соответствующий ей уровень риска отказа конструкции. Решение данной задачи позволяет не проводить длительное и дорогостоящее обследование стартового сооружения, а определить категорию ТС конструкций по результатам прогнозирования оценок показателей состояния, полученных при ранее проведенных обследованиях.

В статье рассматривается подход к решению задачи оценки уровня риска аварии конструкции стартового сооружения на основе использования данных об индексах надежности и оценках постоянной износа ЖБК, полученных при ранее проведенных обследованиях.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УРОВНЯ РИСКА АВАРИИ КОНСТРУКЦИИ НА ОСНОВЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАНЕЕ ПРОВЕДЕННОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ

Пусть для конструкции стартового сооружения введено n категорий технического состояния. В соответствии с ГОСТ 31937-2011 в настоящее время рассматриваются четыре категории ТС конструкций ($n = 4$). Однако в некоторых случаях вводятся и рассматриваются дополнительные категории ТС элементов сооружений.

Значение уровня риска $Q(e_j)$ ($i < j \leq n$, $i \in [1(1)n]$) аварии конструкции стартового сооружения для категории e_j ТС может быть найдено с помощью индекса надежности $\beta(e_j)$ [8, 9]. Для достаточно большого количества типов железобетонных конструкций получены оценки такого показателя их безотказности для каждой из категорий их технического состояния. Зная индексы надежности для категорий ТС, можно получить расчетные значения уровня риска аварии ЖБК с помощью выражения

$$Q(e_j) = \Phi(-\beta(e_j)), \quad i < j \leq n, \quad i \in [1(1)n], \quad (1)$$

где $\Phi(-\beta(e_j))$ – интеграл Лапласа.

Однако показатель $\beta(e_j)$ не зависит от времени эксплуатации сооружения. Поэтому для применения соотношения (1) необходимо провести обследование стартового сооружения непосредственно на момент подготовки с целью идентификации категории ТС конструкции.

Предположим, что для рассматриваемой ситуации ресурсы не позволяют выполнить обследование стартового сооружения. Значит, необходимо использовать имеющиеся в распоряжении эксплуатационного персонала полученные ранее данные для идентификации категории ТС конструкции стартового сооружения. Важнейшим из них для решения задачи является оценка постоянной износа конструкции на момент обследования [9, 10]. Данный показатель зависит от категории ТС в момент обследования сооружения, а также позволяет прогнозировать изменение категории ТС конструкции во времени.

Предположим, что определяется оценка постоянной износа $\lambda(t_{\text{обсл}}|e_i)$ конструкции при условии, что обследование проведено через интервал $t_{\text{обсл}}$ эксплуатации после ввода стартового сооружения в эксплуатацию, и идентифицирована категория e_i ($i \leq n$) технического состояния ЖБК на момент проведения обследования. Данный показатель определяется с помощью соотношения [9, 10]

$$\lambda(t_{\text{обсл}}|e_i) = -\frac{\ln(y(e_i))}{t_{\text{обсл}}}, \quad i = 1(1)n, \quad (2)$$

где $y(e_i)$ – уровень относительной надежности конструкции на момент обследования.

Показатель $y(e_i)$ определяется с помощью соотношения

$$y(e_i) = 1 - \varepsilon(e_i), \quad i \leq n, \quad (3)$$

где $\varepsilon(e_i)$ – экспертная оценка поврежденности конструкции на момент обследования.

Теперь построим зависимость времени $t(e_j|t_{\text{обсл}}, e_i)$ достижения конструкцией состояния e_j ($i \leq j$) при условии, что при обследовании через срок эксплуатации $t_{\text{обсл}}$ конструкция находилась в категории e_i ТС. Для этого используем формулу (2). Искомая зависимость имеет следующий вид:

$$t(e_j|t_{\text{обсл}}, e_i) = -\frac{\ln[y(e_j)]}{\lambda(t_{\text{обсл}}|e_i)}, \quad i < j \leq n, \quad i \in [1(1)n]. \quad (4)$$

В логарифм числителя дроби в правой части соотношения (4) необходимо подставить значение относительной надежности $y(e_j)$ конструкции, соответствующее рассматриваемой категории e_j ТС, а в знаменатель – значение постоянной износа $\lambda(t_{\text{обсл}}|e_i)$ конструкции, которое определено при обследовании стартового сооружения после срока $t_{\text{обсл}}$ эксплуатации.

Определим категорию e_j ТС конструкции, которая может быть достигнута за заданное время эксплуатации $T_{\Delta}(e_j|t_{\text{обсл}}, e_i)$. Для решения данной задачи используем соотношение (4). При этом будем рассматривать K значений показателя $t_{\text{обсл}}$. Указанная зависимость приведена в виде табл. 1.

Таблица 1

Время достижения категории ТС конструкции

Срок эксплуатации до обследования, $t_{\text{обсл}}$	Уровень относительной надежности конструкции для категории ТС конструкции			
	$y(e_{i+1})$	$y(e_{i+2})$...	$y(e_n)$
$t_{\text{обсл}1}$	$T_{\Delta}(e_{i+1} t_{\text{обсл}1}, e_i)$	$T_{\Delta}(e_{i+2} t_{\text{обсл}1}, e_i)$...	$T_{\Delta}(e_n t_{\text{обсл}1}, e_i)$
$t_{\text{обсл}2}$	$T_{\Delta}(e_{i+1} t_{\text{обсл}2}, e_i)$	$T_{\Delta}(e_{i+2} t_{\text{обсл}2}, e_i)$...	$T_{\Delta}(e_n t_{\text{обсл}2}, e_i)$
...
$t_{\text{обсл}K}$	$T_{\Delta}(e_{i+1} t_{\text{обсл}K}, e_i)$	$T_{\Delta}(e_{i+2} t_{\text{обсл}K}, e_i)$...	$T_{\Delta}(e_n t_{\text{обсл}K}, e_i)$

Для определения категории e_j технического состояния конструкции за заданное время T_3 эксплуатации стартового сооружения необходимо в первом столбце табл. 1 выбрать значение $t_{\text{обсл}k}$, соответствующее проведенному обследованию, и в строке, соответствующей этому значению, – минимальное значение $T_{\Delta}(e_j | t_{\text{обсл}k}, e_i)$, наиболее близкое слева к T_3 . Столбец, в котором находится указанное значение $T_{\Delta}(e_j | t_{\text{обсл}k}, e_i)$, соответствует искомой категории ТС конструкции. Поскольку расчетные значения $T_{\Delta}(e_j | t_{\text{обсл}k}, e_i)$, приведенные в табл. 1, являются граничными для рассматриваемых категорий ТС, то очевидно, что значение T_3 , для которого выполняется неравенство

$$T_{\Delta}(e_j | t_{\text{обсл}k}, e_i) \leq T_3 < T_{\Delta}(e_{j+1} | t_{\text{обсл}k}, e_i), \quad j \geq i, \quad i \in [1(1)n], \quad (5)$$

соответствует категории e_j , т. е. категории ТС с ближайшим меньшим номером.

Таким образом, решена задача идентификации категории ТС конструкции на момент начала подготовки к запуску КА.

ЭТАПЫ МЕТОДИКИ ОЦЕНИВАНИЯ РИСКА АВАРИИ КОНСТРУКЦИИ СТАРТОВОГО СООРУЖЕНИЯ

На основании математического описания задачи определения уровня риска аварии конструкции на основе прогнозирования результатов ранее проведенного обследования сформируем последовательность этапов

Этап 1. Определение оценки $\lambda(t_{\text{обсл}} | e_i)$ постоянной износа конструкции по результатам обследования с помощью соотношений (2) и (3).

Этап 2. Определение значений времени достижения конструкцией категорий технического состояния при эксплуатации $t(e_j | t_{\text{обсл}}, e_i)$ с помощью формулы (4).

Этап 3. Определение категории e_j технического состояния конструкции за заданное время $T_{\Delta}(e_j | t_{\text{обсл}}, e_i)$ эксплуатации стартового сооружения с помощью табл. 1.

Этап 4. Расчет значения уровня риска аварии конструкции на начало интервала запуска КА с использованием соотношения (1).

РАСЧЕТНЫЙ ПРИМЕР

Исходные данные. Количество n категорий технического состояния конструкции равно четырем в соответствии с ГОСТ 31937–2011 ($n = 4$).

Оценки индексов надежности для категорий ТС ЖБК приведены в табл. 2.

Таблица 2

Оценки индексов надежности конструкции

Работоспособное ТС e_2	Ограниченно работоспособное ТС e_3	Аварийное ТС e_4
3,80	2,43	2,05

Оценки средних значений относительной надежности для категорий ТС конструкции приведены в табл. 3.

Таблица 3

Средние значения относительной надежности для категорий ТС конструкции

Категории технического состояния конструкции			
Нормативное ТС e_1	Работоспособное ТС e_2	Ограниченно работоспособное ТС e_3	Аварийное ТС e_4
0,95	0,90	0,88	0,80

Необходимо: определить значение оценки уровня риска аварии конструкции через 15 лет эксплуатации, если при обследовании через 4 года с момента ввода стартового сооружения в эксплуатацию ($t_{\text{обсл}} = 4$) установлено, что конструкция находится в категории «нормативное техническое состояние» (e_1).

Решение задачи.

Сначала определим расчетные значения постоянной износа для возможных значений сроков эксплуатации до определения категории e_1 ТС конструкции, а также соответствующие им сроки эксплуатации стартового сооружения после соответствующего обследования. Расчетные данные приведены в табл. 4.

Таблица 4

Срок эксплуатации конструкции до достижения категорий ТС

Срок эксплуатации конструкции до определения постоянной износа	Значения постоянной износа конструкции для выявленной категории ТС	Категория ТС конструкции		
		Работоспособное ТС	Ограниченно работоспособное ТС	Аварийное ТС
2,0	0,05268	4,11	4,98	8,70
2,5	0,04214	5,14	6,23	10,88
3,0	0,03512	6,16	7,48	13,05
3,5	0,03010	7,19	8,72	15,23
4,0	0,02634	8,22	9,97	17,40
4,5	0,02341	9,24	11,21	19,58
5,0	0,02107	10,27	12,46	21,75
5,5	0,01916	11,30	13,71	23,93
6,0	0,01756	12,32	14,95	26,10
6,5	0,01621	13,35	16,20	28,28
7,0	0,01505	14,38	17,45	30,45

Для нахождения искомого показателя осуществим вход в таблицу, задав на оси ординат значение 4 года и определив, между какими значениями находится заданный срок эксплуатации (15 лет). Категория соответствует ближайшему меньшему табличному значению срока

эксплуатации конструкции. Графическая иллюстрация решения рассмотренной задачи приведена на рис. 1. На осях рис. 1 используется размерность «год».

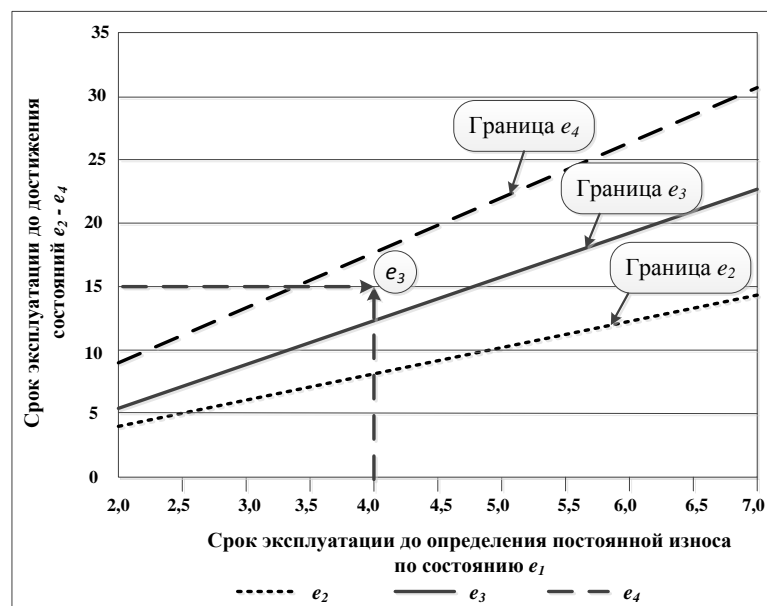


Рис. 1. Порядок определения категории ТС конструкции

Стрелки на рис. 1 показывают действия, которые необходимо выполнить для определения прогнозируемой категории ТС конструкции.

В соответствии с предложенной методикой через 15 лет эксплуатации конструкция будет находиться в категории «ограниченно работоспособное техническое состояние». При этом уровень риска аварии конструкции равен 0,02018.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье рассмотрена методика оценивания уровня риска отказа железобетонной конструкции стартового сооружения, которая позволяет получать значение искомого показателя без проведения обследования технического состояния сооружения. Это позволяет, в свою очередь, обосновать состав необходимых действий по подготовке стартового сооружения к целевому применению в условиях существенных ограничений по необходимым ресурсам.

Методика базируется на использовании индекса надежности конструкции и уровня износа для идентификации технического состояния ЖБК при прогнозировании изменения относительной надежности конструкции за заданное время эксплуатации.

Список используемых источников

1. Бармин И. В., Неустров В. Н. Техническое состояние и диагностика объектов наземной космической инфраструктуры космодрома в процессе эксплуатации объектов за пределами назначенных показателей ресурса и срока службы // Полет : общерос. научно-техн. жур. – 2018. – № 8. – С. 3–15.
2. Перминов А. Н. Управление наземной космической инфраструктурой на основе мониторинга ее состояния : моногр. – МО РФ, 2005. – 320 с.

3. Определение срока службы конструкций, зданий и сооружений / Н. Г. Келасьев [и др.] // Промышленное и гражданское строительство. – 2020. – № 2. – С. 12–17.
4. Ковалев Р. Б., Ковалев Б. И. Оценка риска в строительстве на различных стадиях жизненного цикла // Молодежь и XXI век : мат. VIII Международной молодежной науч. конф. : в 5 т. – Курск, 2018. – Т. 4. – С. 288–291.
5. Гвоздев Е. В. О вероятностном определении надежности объекта техносферы при опасных воздействиях // Научная жизнь. – 2020. – Т. 15, № 6(106). – С. 809–818.
6. Соловьев С. А. Анализ надежности элементов строительных конструкций на основе комбинации теории случайных множеств и вероятностных распределений // Строительная механика и расчет сооружений. – 2020. – № 2(289) – С. 61–66.
7. Исхаков Ш. Ш., Ковалев Ф. Е., Котович В. Г. К вопросу об идентификации количественных показателей надежности эксплуатируемых зданий и сооружений наземной инфраструктуры войск // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2015. – Вып. 648. – С. 133–138.
8. Пичугин С. Ф., Семко А. В., Махинько А. В. К определению коэффициента надежности по назначению с учетом рисков в строительстве // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2005. – № 11-12(563-564). – С. 104–109.
9. Методика оценки остаточного ресурса несущих конструкций зданий и сооружений : метод. рекомендации / М-во строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. – М. : Федеральное автономное учреждение «Федеральный центр нормирования, стандартизации и оценки соответствия в строительстве», 2018. – 27 с.
10. Добронравов А. Н. Оценка надежности зданий и сооружений по внешним признакам : справ. пособие. – М. : Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2008. – 45 с.

Ю. В. Козлов,
кандидат военных наук;
М. А. Кукушкин,
кандидат военных наук;
Д. Ю. Пономарев

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ МЕТОДИКИ ПЛАНИРОВАНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ СРЕДСТВ УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ

В статье предложена усовершенствованная методика планирования применения сил и средств для проведения операций управления космическими аппаратами (КА) с использованием обновленного алгоритма распределения заявок на проведение операций управления КА. Обосновано увеличение количества показателей оценивания эффективности процесса управления для решения задачи координационного планирования в условиях многокритериальной неопределенности.

Ключевые слова: планирование применения средств управления КА, критерии эффективности.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях открытого сдерживания развития Российской Федерации коалицией стран Запада во главе с США, Президент нашей страны Владимир Владимирович Путин в Послании Федеральному собранию поставил задачу на расширение присутствия Российской Федерации в околоземном космическом пространстве и эффективном его использовании в укреплении обороноспособности страны [1]. Решение поставленной задачи претворяется в жизнь путем расширения номенклатуры и увеличения количества КА на орбите, в том числе и за счет замены отдельных больших КА группировками (кластерами, роями) малых КА. Так, в рамках реализации федеральной целевой программы «Сфера» к 2030 г. на орбиту планируется запустить более 600 КА, в том числе до 300 серийно выпускаемых [2]. Это неизбежно приведет к увеличению числа требуемых операций управления (ОУ) в единицу времени и нагрузки на существующие силы и средства управления КА. Кроме того, это усложнит и без того нетривиальную задачу планирования их применения, от качества решения которой напрямую зависит эффективность процесса управления КА и в значительной степени – обеспечение эффективности их применения. Поэтому усовершенствование научно-методического аппарата планирования применения средств управления КА за счет расширения состава показателей оценивания эффективности процесса управления является актуальной военно-научной задачей.

УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ МЕТОДИКА ПЛАНИРОВАНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ СРЕДСТВ УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ

Существующий подход к формированию Плана применения средств управления КА (далее – План) реализует поиск первого рационального варианта, удовлетворяющего двум критериям, и не учитывает ряд достаточно важных показателей, значения которых могут влиять на эффективность управления КА в целом. Определение таких показателей может повысить обоснованность принимаемых решений при составлении и коррекции существующих планов применения средств управления КА) [3]. К этим показателям можно отнести (табл. 1) опре-

деленные эмпирическим путем В1–В4, учет значения которых позволит повысить качество планирования.

Однако предложенная оптимизация планирования не может рассматриваться как отдельная задача, решаемая после формирования Плана, так как в этом случае возникают большие трудности в учете сложных отношений между различными средствами управления КА [4]. Поэтому данная задача должна решаться в процессе формирования заявок на применение наземных средств управления отдельными КА и их группировками путем формулирования соответствующих ограничений на применение таких средств.

Таблица 1

Дополнительные показатели и критерии оценки эффективности планирования применения средств управления КА

№ п/п	Обозначение показателя	Название показателя	Размерность	Критерии
1	В1	Количество привлекаемых пунктов / средств на этих пунктах управления КА	шт. / кол-во комплектов	→min
2	В2	Средняя наработка средств управления КА	ч / сут.	$T_{\min}^{\text{cp}} \geq T_l^{\text{cp}} \geq T_{\max}^{\text{cp}}$
3	В3	Количество ОУ в суточном плане в ночное время	шт.	→min
4	В4	Количество несгруппированных (отдельных) ОУ на каждом пункте (средстве) в суточном плане	шт.	→min

Значения данных показателей хоть и связаны между собой, например, минимизация количества привлекаемых к управлению конкретным КА пунктов и средств на этих пунктах (В1) обеспечивает большую сгруппированность ОУ КА на заданном временном интервале и исключение длительных перерывов между операциями (сеансами управления), но использование единого интегрального показателя весьма затруднительно [4, 5].

Поскольку наилучшим способом выполнения технологического цикла управления (ТЦУ) КА является привлечение минимально необходимого количества средств управления КА и резервирование основных ОУ КА [4], при проведении ОУ КА задействуются, как правило, средства двух пунктов управления (ПУ) КА в полном объеме («основной» и «резервный» последовательно по трассе полета КА). В случае возникновения неисправности на средствах управления КА на «основном» пункте, ОУ КА выполняет «резервный» пункт. В условиях резкого увеличения количества обслуживаемых КА (в результате наращивания ОГ КА) и/или снижения количества средств [3] возможности резервирования будут уменьшаться, что потребует минимизации привлекаемых пунктов и средств управления КА.

Содержанием этапов подготовки к операциям управления КА являются стандартные процедуры, такие как включение аппаратуры, автономные и комплексные проверки аппаратных комплексов и т. д. Поэтому при серийности запланированных ОУ КА на одном средстве управления КА не требует проведения всего комплекса мероприятий при каждой подготовке к операциям управления КА. Обеспечение сгруппированности по времени ОУ КА позволяет экономить электроэнергию, бумажные носители информации и другие ресурсы, кроме того, при равном количестве выполненных ОУ КА позволит уменьшить наработку средств управления КА и продлить их технический ресурс.

Обеспечение равномерности загрузки пунктов и средств управления КА (показатель В2) позволяет в течение года равномерно расходовать ресурс всего парка средств управления КА, планомерно проводить их техническое обслуживание, восстановление и продление ресурса. В случае неравномерной загрузки средств отдельных пунктов происходят существенный расход ресурса на одном-двух пунктах управления КА, «лавинное» увеличение отказов и вывод соответствующих средств данных пунктов управления КА из контура управления КА. Соответственно, после исключения из процесса одного или нескольких средств управления КА резко возрастает нагрузка на оставшиеся и увеличивается вероятность их отказа.

Важность качественного проведения ОУ КА и возможность выделения любых имеющихся ресурсов (технических, людских и пр.) не отменяют организацию повседневной эксплуатации средств управления КА и выполнение задач управления КА с учетом требований по расходу ресурса техники, а также рациональной организации труда и отдыха персонала. Планирование операций управления КА с учетом биоритмов персонала (показатель В3) в первой половине светового дня позволяет обеспечить наибольшую внимательность персонала, что, в свою очередь, минимизирует ошибки по его вине по сравнению с вечерними и ночными интервалами суток (с учетом разницы часовых поясов). Уменьшение количества ошибок персонала ведет к снижению вероятности срыва выполнения задач управления КА на данном пункте управления КА, что уменьшает количество необходимых коррекций сформированного плана применения средств управления КА на этапе его реализации и задействования других пунктов управления КА.

Исключение одиночных операций (показатель В4) позволит сэкономить ресурсы средств управления КА (увеличение межремонтного интервала в целом, количества часов эксплуатации дорогостоящих высокотехнологичных устройств, в частности дорогостоящих ламп бегущей волны, клистронов и пр.), снизить расход электроэнергии и степень утомления обслуживающего персонала. Это связано с тем, что внутри пунктов управления КА для проведения одиночной ОУ КА необходимо осуществить весь технологический цикл подготовки к нему в рамках одного пункта управления КА. Для проведения серии ОУ на одном средстве управления КА по одному или разным КА нет необходимости в процессе последующих ОУ выключать и включать аппаратуру, проводить автономные проверки и т. д.

Для решения задачи планирования с учетом дополнительных показателей предлагается использовать алгоритм многокритериальной оптимизации, позволяющий строить результирующее отношение предпочтения и задавать требования к вновь формулируемым вариантам плана в условиях, когда относительные веса показателей не заданы или одинаковы. Он основан на известном методе варьирования ограничений [4]. При этом будем полагать, что критерием оптимальности является минимум соответствующего показателя (попадания в заданный интервал).

Предлагаемая усовершенствованная методика планирования применения средств управления КА, которая предполагает использование расширенного состава показателей (критериев), представлена на рис. 1.

На предварительном этапе формируется набор исходных данных, включающий совокупность поступивших заявок на проведение операций управления КА, совокупность средств управления КА, информацию о состоянии этих средств, их доступности и условий применения, а также системы предлагаемых показателей.

На **этапе 1** выполняется формирование исходного множества альтернатив на основе концепции «векторных уступок».

Шаг 1. Расчет вариантов Плана, оптимальных по частным показателям.

После выполнения шага 1 количество вариантов соответствует количеству используемых показателей качества Плана и все полученные варианты принадлежат множеству недоминируемых альтернатив.

Шаг 2. Оценка каждого из планов по всем показателям (расчет матрицы значений показателей В1–В4), где строки соответствуют вариантам плана, а столбцы – показателям качества плана.

Шаг 3. Определение допустимых диапазонов изменения показателей. Значения показателей для следующего варианта плана не должны превышать величины, отличающейся от оптимального значения показателя на величину заданной по определенному правилу уступки [4].

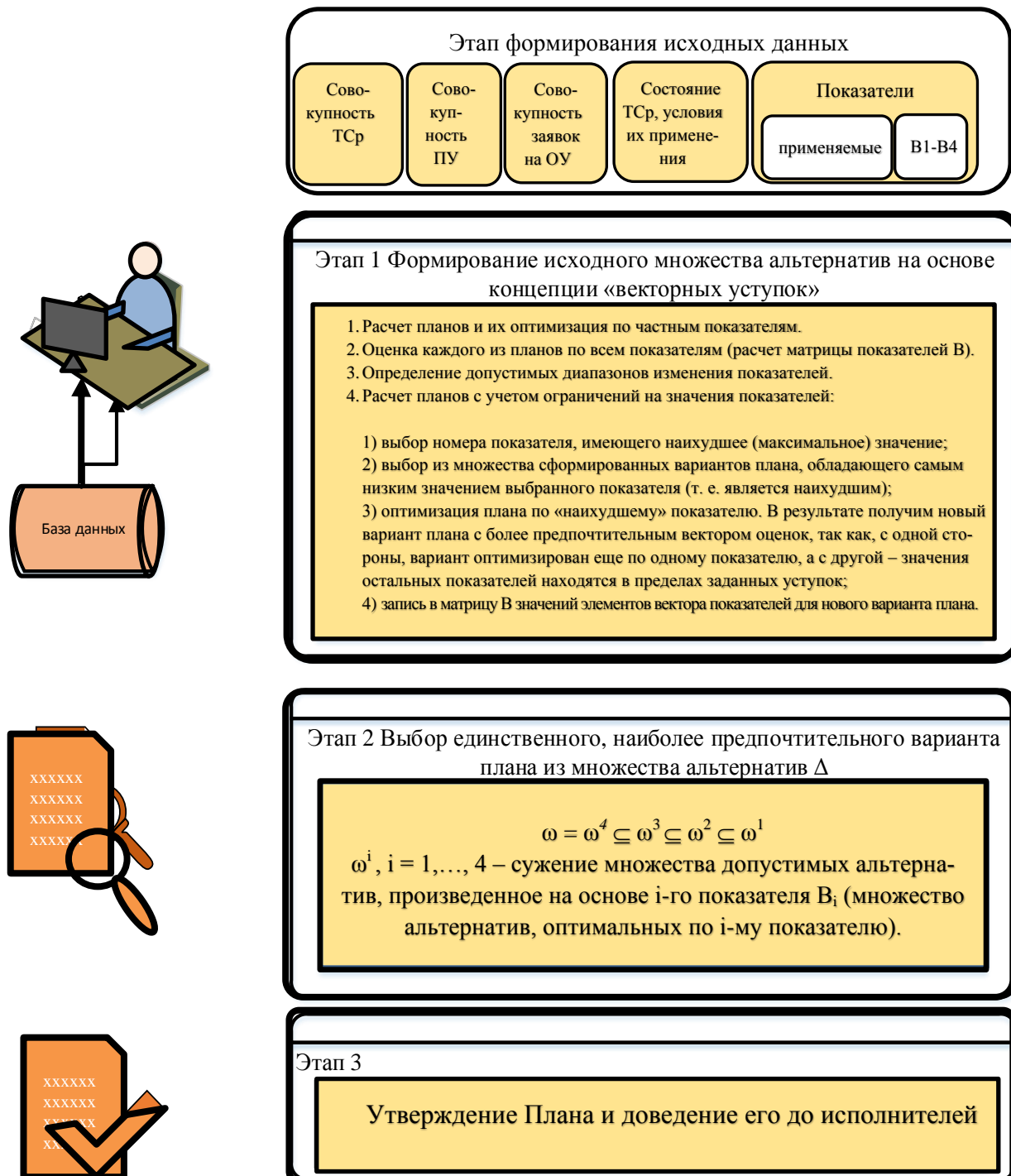


Рис. 1. Усовершенствованная методика планирования применения средств управления КА

Шаг 4. Расчет планов с учетом ограничений на значения показателей:

- 1) выбор номера показателя, имеющего наихудшее (максимальное) значение;
- 2) выбор из множества сформированных вариантов Плана, обладающего самым низким значением выбранного показателя (т. е. являющегося наихудшим);
- 3) оптимизация Плана по «наихудшему» показателю. В результате получим новый вариант Плана с более предпочтительным вектором оценок, так как, с одной стороны, вариант оптимизирован еще по одному показателю, а с другой – значения остальных показателей находятся в пределах заданных уступок;

4) запись в матрицу В значений элементов вектора показателей для нового варианта Плана. При этом вновь полученный вектор показателей приписывается к матрице Р снизу.

Шаги 3 и 4 повторяются до тех пор, пока не будет получено множество альтернатив, диапазон изменения показателей которых удовлетворяет заданным требованиям.

Таким образом, цель этапа 1 достигнута, т. е. сформировано множество вариантов Плана Δ , в пределах которого на этапе 2 следует искать рациональное (в рамках заданной системы показателей качества Плана) решение. Это множество включает (по построению) варианты Плана, значения показателей которых не превышают компромиссных значений, отклоняющихся от «идеальной» точки, полученной на шаге 1, на заданные величины уступок по каждому из показателей.

На **этапе 2** происходит выбор единственного, наиболее предпочтительного варианта Плана из множества альтернатив Δ . С этой целью на данном этапе вводится дополнительное отношение предпочтения, заданное с помощью некоторой согласующей функции. При выборе согласующей функции обычно используют две вспомогательные процедуры: нахождение идеальной точки (она уже определена на шаге 1 этапа 1) и нормализация значений показателей.

Данные показатели носят неформализуемый характер и используются алгоритмически при построении вариантов планов применения средств управления КА. При этом используется принцип последовательного сужения множества альтернатив по правилу [4]

$$\omega = \omega^4 \subseteq \omega^3 \subseteq \omega^2 \subseteq \omega^1. \quad (1)$$

Здесь ω^i , $i = 1, \dots, 4$ – сужение множества допустимых альтернатив, произведенное на основе i -го показателя B_i (множество альтернатив, оптимальных по i -му показателю).

При формировании Плана необходимо стремиться к снижению количества коррекций на этапе его реализации, исключению излишнего резервирования средств управления КА, а также к появлению возможности сохранить и использовать их резерв в случае необходимости (внеплановое использование ресурса средств управления КА для проведения ОУ КА).

Каждая заявка любого центра управления полетом (ЦУП) характеризуется номером ЦУП; номером КА; операцией управления (информационного взаимодействия), необходимой для реализации ТЦУ; временем, к которому должна быть выполнена операция управления (витком); перечнем ПУ КА и средств управления, способных выполнить указанную операцию.

Для формализованного описания методики введем в рассмотрение следующие множества.

1. Множество ЦУП, каждый из которых управляет КА определенного назначения:

$$Q = \{Q_\pi, \pi \in R\}, \quad R = \{1, \dots, r\}. \quad (2)$$

2. Множество КА, управляемых из конкретного ЦУП:

$$A = \{A_\nu, \nu \in N\}, \quad N = \{1, \dots, n\}. \quad (3)$$

3. Множество ПУ:

$$G = \{G_\mu, \mu \in M\}, \quad M = \{1, \dots, m\}. \quad (4)$$

4. Множество операций управления (информационного взаимодействия):

$$H = \{H_\chi, \chi \in K\}, \quad K = \{1, \dots, k\}. \quad (5)$$

Каждая операция характеризуется длительностью выполнения h_χ и приоритетом $p_{v\chi}$

5. Множество средств управления КА:

$$C = \{C_\lambda, \lambda \in L\}, \quad L = \{1, \dots, l\}. \quad (6)$$

Каждое техническое средство может выполнить только определенные операции из множества H .

6. Контактный потенциал $\varepsilon_{v\mu}(t)$ пары $v-\mu$, отражающий факт наличия или отсутствия для A_v КА зоны видимости с G_μ ПУ КА и, соответственно, возможности выполнения находящихся на нем средств управления КА операций:

$$\varepsilon_{v\mu}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } A_v(t) \in G_\mu(t) \\ 0, & \text{если } A_v(t) \notin G_\mu(t) \end{cases}. \quad (7)$$

7. Интервал времени $T = [t_0, t_f]$, на котором осуществляется планирование (распределение заявок на применение средств управления КА по управлению КА). На интервале T для A_v КА выделим η_v непересекающихся участков, соответствующих виткам.

8. Канальный потенциал

$$\Theta(t)_{v\mu\lambda\chi} \in \{0, 1\}, \quad (8)$$

определяющий наличие ($\Theta(t)_{v\mu\lambda\chi} = 1$) на момент времени t , исправного (готового) средства управления C_λ на G_μ ПУ, способного выполнить H_χ операцию с A_v КА. Канальный потенциал позволяет учитывать процесс деградации/наращивания возможностей технической и организационной структур наземного комплекса.

9. Опишем сеанс управления формально пятеркой: $\langle v, \chi, \mu, \lambda, \eta \rangle$, и соответствующий выполнению по КА A_v операции H_χ средством C_λ , размещенным на G_μ ПУ КА на витке η_v .

10. Множество возможных сеансов управления (заявок) U представляется массивом пятерок:

$$U = \{\langle v, \chi, \mu, \lambda, \eta \rangle\}. \quad (9)$$

Управляющее воздействие вида

$$u(t)_{v\chi\mu\lambda} \in \{0, 1\}, \quad v = \overline{1, n}, \quad \mu = \overline{1, m}, \quad \chi = \overline{1, k}, \quad \lambda = \overline{1, l}, \quad (10)$$

определяет выполнение в момент времени t операции H_χ средством C_λ , размещенным на G_μ ПУ в сеансе управления с A_v КА.

Для включения операции управления в план применения средств необходимо выполнить совокупность технологических и технических ограничений, определяющих область допустимых альтернатив управляющих воздействий: $U^{(o)} \in U$. Эти ограничения, формирующие

область $U^{(o)}$, раскрывают причинно-следственные связи и отношения между ОУ в рамках одного сеанса:

– ограничение несовместности (запрет на выполнение несовместных операций):

$$\sum_{\chi \in K^1} \sum_{\mu=1}^m \sum_{\lambda=1}^l u(t)_{v\chi\mu\lambda} \leq 1, \quad K^1 \in K, \quad \forall v = \overline{1, n}, \quad (11)$$

где K^1 – множество номеров несовместных операций;

– ограничение длительности – суммарная продолжительность операций должна быть меньше продолжительности зон радиовидимости (ЗРВ):

$$\sum_{\chi}^k \sum_{\lambda=1}^l h_{\chi} u(t)_{v\chi\mu\lambda} \leq s(t)_{v\mu}, \quad \forall v = \overline{1, n}, \quad \mu = \overline{1, m}, \quad (12)$$

где $s(t)_{v\mu}$ – продолжительность ЗРВ A_v КА с ПУ G_{μ} ;

– ограничение одновременности (запрет выполнения одной операции одновременно с несколькими КА):

$$\prod_{v=1}^n \sum_{\chi=1}^k u(t)_{v\mu\chi\lambda} = 0, \quad \forall \mu = \overline{1, m}, \quad \lambda = \overline{1, l}, \quad (13)$$

– ограничение непревышения (запрет одновременной работы КА с несколькими средствами управления):

$$\sum_{\mu=1}^m \sum_{\lambda=1}^l u(t)_{v\chi\mu\lambda} \leq 1, \quad \forall v = \overline{1, n}, \quad \chi = \overline{1, k}. \quad (14)$$

Тогда задача формирования плана выполнения поступивших заявок заключается в определении таких управляющих воздействий $u(t)_{v\chi\mu\lambda}$ ($v = \overline{1, n}$, $\mu = \overline{1, m}$, $\chi = \overline{1, k}$, $\lambda = \overline{1, l}$), при которых суммарное количество выполняемых наиболее важных операций максимально:

$$J(u(t)_{v\chi\mu\lambda}) = \sum_{v=1}^n \sum_{\chi=1}^k \sum_{\mu=1}^m \sum_{\lambda=1}^l p(t)_{v\chi} \varepsilon(t)_{v\chi\mu\lambda} \theta(t)_{v\chi\mu\lambda} u(t)_{v\chi\mu\lambda} \rightarrow \max_{u(t)} \quad (15)$$

при $u(t)_{v\chi\mu\lambda} \in \{0, 1\}$ и выполнении ограничений (11)–(14).

Данная задача относится к классу задач оптимального управления и может решаться с использованием соответствующих методов и существующего моделирующего комплекса [4, 6].

Результаты моделирования [6] показывают следующее:

– обеспечение равномерности загрузки средств управления КА и учет часовых поясов при планировании ОУ на разных пунктах управления позволяют при заданной интенсивности заявок на ОУ снизить долю невыполненных ОУ по причине «человеческого фактора», уменьшить количество неисправностей (исключив или снизив пиковые нагрузки на одних средства управления и простои на других), снизить количество случаев перепланирования, что в конечном счете приводит к увеличению доли выполненных ОУ в плановом порядке на 17–21%;

– учет сгруппированности по времени и исключение одиночных ОУ в плане применения конкретных средств управления КА на суточном интервале приводит к снижению совокупного расхода электроэнергии за месяц эксплуатации на 7–10%;

– равномерный расход ресурсов позволяет увеличить среднее время наработки на отказ средств управления КА на 8–14%.

Опираясь на полученные в ходе моделирования результаты и учитывая дискретный характер выполнения операций управления, можно прогнозировать (рис. 2) повышение эффективности применения средств управления КА (выраженное отношением количества поступивших

заявок на ОУ к количеству выполненных ОУ) и процесса управления КА в целом не менее чем на 10%.

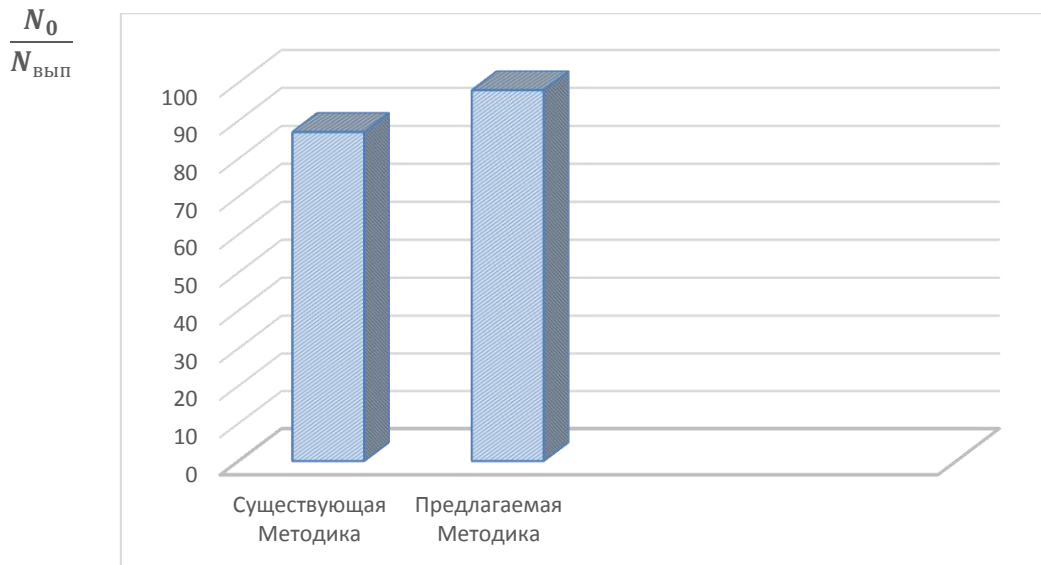


Рис. 2. Эффективность процесса применения средств управления КА

Учет предложенных показателей качества планирования позволяет повысить эффективность процесса планирования применения наземных средств управления КА за счет рассмотрения большего количества альтернативных вариантов планов, последовательного сокращения их количества с учетом вводимых ограничений на этапе 1, что позволяет, в свою очередь, сократить также время на принятие решения, а на этапе 2 – время выбора управляющего воздействия $u^*(t)_{\nu\chi\mu\lambda}$, обеспечивающего максимальное суммарное количество выполняемых наиболее важных операций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Усовершенствованная методика планирования применения средств для проведения операций управления космическими аппаратами позволяет повысить качество управления при заданном расходе ресурсов (обеспечить снижение расхода имеющихся ресурсов при заданном качестве управления). Повышение качества формируемого Плана увеличивает возможности средств управления КА по выполнению ОУ в условиях резкого возрастания нагрузки на средства управления КА.

Внедрение данного подхода не повлечет значительных затрат, так как требует лишь доработки существующего программного обеспечения.

Список используемых источников

1. Послание Президента Российской Федерации Путина Владимира Владимировича Федеральному собранию от 21.04.21. – URL: www.kremlin.ru (дата обращения: 20.05.2023).
2. Проект «Сфера» переходит к практической реализации. – URL: www.roscosmos.ru/33771/ (дата обращения: 20.05.2023).
3. Григорьев К. Л., Козлов Ю. В., Пономарев Д. Ю. Обоснование предложений по повышению качества планирования применения наземных технических средств при обеспечении

управления орбитальной группировкой космических аппаратов // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2021. – Вып. 679. – С. 297–304.

4. *Соколов Б. В., Тарасов О. М.* Оптимизация принятия решения с учетом множества показателей // Проблемы управления информатики. – 2005. – № 6. – С. 96–104.

5. Проблемы автоматизированного управления космическими средствами : учеб. пособие / под ред. Ю. С. Мануйлова. – МО РФ, 2001. – 180 с.

6. *Колпин М. А., Проценко П. А., Слащев А. В.* Методика оценивания эффективности функционирования наземного автоматизированного комплекса управления космическими аппаратами // Труды МАИ. – 2017. – Вып. 92. – С. 100–118.

А. М. Петухов,
кандидат технических наук;
А. Ю. Холодок

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНИВАНИЮ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕВОДОМ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ В РАЗЛИЧНЫЕ СОСТОЯНИЯ ПРИ ДЕСТРУКТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ НА ЕЕ ЭЛЕМЕНТЫ

В статье описывается методический подход к оцениванию управления переводом организационно-технической системы военного назначения в различные состояния при деструктивных воздействиях на ее элементы, в частности – с использованием показателей ресурсоемкости мероприятий перевода и оперативности управления.

Ключевые слова: организационно-технические системы военного назначения, оценивание системы.

ВВЕДЕНИЕ

Для организационно-технических систем военного назначения (далее – ОТС) характерны периоды перевода системы в различные состояния [1] (далее – перевод ОТС). Успешное выполнение задач перевода ОТС зависит как от качества работы, проведенной на подготовительном этапе (заблаговременного планирования мероприятий перевода, подготовки ОТС, создания необходимых запасов), так и от действий элементов ОТС при переводе. Таким образом, перевод ОТС целесообразно рассматривать как процесс, состоящий из двух этапов: подготовительного и исполнительного.

Управление переводом ОТС будет иметь особенности для каждого из указанных этапов. На подготовительном этапе органом управления планируется процесс перевода, проводится обучение элементов ОТС, а для исполнительного этапа характерны жесткая регламентация по времени и вероятность деструктивных воздействий противника по элементам ОТС. Организация процесса управления переводом ОТС с научным обоснованием выбранного подхода требует опоры на соответствующий научно-методический аппарат (систему показателей и критериев оценивания управления переводом). Но в результате анализа научных работ, посвященных ОТС и вопросам теории управления, было выявлено, что исследованию вопросов перевода ОТС и управления этими процессами уделяется крайне мало внимания. В связи с чем актуальной становится задача разработки системы показателей и критериев оценивания управления переводом ОТС.

Одним из основных показателей, используемым во многих научных школах для оценивания качества управления, является эффективность. Традиционно эффективность – это комплексный показатель, с помощью которого оценивание осуществляется на основании частных компонент. Совокупность частных показателей в рамках различных научных коллективов отличается и наименованиями, и наборами определяющих их переменных.

В качестве частных показателей оценивания эффективности управления переводом организационно-технической системы принимаются *оперативность управления* (в исполнительном периоде) и *ресурсоемкость мероприятий* (как результат управления ресурсами). Основанием для этого служат:

- анализ подходов различных научных школ к построению систем показателей оценивания эффективности управления организационными системами в различных сферах деятельности;
- изучение особенностей процесса перевода ОТС в заданное состояние;

– принятие допущения о том, что подготовка элементов ОТС, создание запасов – это необходимые условия перевода ОТС, а управление ими не оценивается.

Рассмотрим более подробно порядок и выражения для формирования таких частных показателей.

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНИВАНИЮ ПЕРЕВОДА ОТС ПО ПОКАЗАТЕЛЮ «РЕСУРСООЕМКОСТЬ МЕРОПРИЯТИЯ»

В целях формализации расчета ресурсоемкости мероприятия определим структуру распределения и порядок учета использования ресурса в ОТС. Как правило, мероприятия перевода являются сложными процессами [2], в ходе которых используются несколько видов ресурсов, закрепленных за элементами ОТС, а также резерв ресурса, находящийся в распоряжении командира. В связи с этим удобно структуру распределения всех ресурсов по элементам ОТС представить в матричном виде:

$$R_{\text{ОТС}} = K_{\text{ОТС}} \cdot R_0, \quad (1)$$

где $R_{\text{ОТС}}$ – матрица распределения ресурсов по подразделениям,

$$R_{\text{ОТС}} = \begin{bmatrix} R_{1,1} & \cdots & R_{1,\rho} & \cdots & R_{1,P} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ R_{\pi,1} & \cdots & R_{\pi,\rho} & \cdots & R_{\pi,P} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ R_{\Pi,1} & \cdots & R_{\Pi,\rho} & \cdots & R_{\Pi,P} \end{bmatrix};$$

$K_{\text{ОТС}}$ – матрица коэффициентов распределения ресурсов по подразделениям,

$$K_{\text{ОТС}} = \begin{bmatrix} K_{1,1} & \cdots & K_{1,\rho} & \cdots & K_{1,P} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ K_{\pi,1} & \cdots & K_{\pi,\rho} & \cdots & K_{\pi,P} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ K_{\Pi,1} & \cdots & K_{\Pi,\rho} & \cdots & K_{\Pi,P} \end{bmatrix};$$

R_0 – матрица ресурсов ОТС, в которой диагональные элементы равны величине соответствующего ресурса в ОТС, а остальные элементы равны нулю,

$$R_0 = \begin{bmatrix} R_1 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & R_\rho & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & R_P \end{bmatrix}.$$

Здесь P – количество видов ресурсов, используемых ОТС;

ρ – условный порядковый номер ресурса, изменяющийся от 1 до P ;

Π – количество элементов в ОТС (с учетом резерва);

π – условный порядковый номер элемента, изменяющийся от 1 до Π .

Порядковый номер столбца матрицы ресурсов $R_{\text{ОТС}}$ (1) соответствует условному порядковому номеру ресурса, строки – условному номеру элемента ОТС, а его величина равна объему назначенного ресурса. Для случая, когда какой-либо вид ресурса элементу ОТС не назначается, соответствующий элемент матрицы ресурсов будет равен нулю.

Ресурсы элементов ОТС могут быть использованы по частям для выполнения различных мероприятий. При этом различные варианты выполнения одного и того же мероприятия могут предполагать различное количество и время использования ресурсов. Следовательно, необходимо рассчитывать ресурсоемкость мероприятия для каждого варианта его выполнения. Кроме того, при расчете ресурсоемкости следует учитывать, что использованию ресурсов сопутствуют этапы доставки (прибытия) в район их использования, восстановления необходимых свойств, возвращение (убытие) в район расположения (рис. 1). Вклад указанных этапов в величину ресурсоемкости следует определять с учетом следующих особенностей:

– этап убытия в район расположения для отдельных ресурсов будет отсутствовать при последовательном их использовании в нескольких мероприятиях без возвращения в район расположения;

– этапы доставки (прибытия) и возвращение (убытие) не характерны для ресурсов, используемых в районе расположения;

– этап восстановления свойств ресурса учитывается, если он осуществляется в ходе проведения мероприятия.

На рис. 1 представлены варианты графиков использования одного вида ресурса при выполнении мероприятия с учетом особенностей:

– элементу π , размещенному в районе выполнения мероприятия (рис. 1,а), доставка и возвращение ресурса не нужны, но потребуются восстановление ресурса;

– ресурс элемента $\pi+1$ доставляется в район выполнения мероприятия (рис. 1,б), а после его использования убывает в район выполнения другого мероприятия, что учитывается при расчете его ресурса;

– ресурс элемента $\pi+2$ доставляется в район его использования (рис. 1,в), а после использования – возвращается в район расположения.

На рис. 1,г представлен график использования ресурса ρ при выполнении ν -го варианта мероприятия m , представляющий собой суперпозицию графиков использования ресурса элементов ОТС.

С учетом особенностей рассмотренного подхода выражение для расчета ресурсоемкости выполнения варианта мероприятия по ресурсу ρ целесообразно представить в виде

$$\Theta_{\rho,\Sigma}^{m,\nu} = \sum_{\pi=1}^{\Pi} \int_{t_{\rho,\pi,H}^{m,\nu}}^{t_{\rho,\pi,K}^{m,\nu}} R_{\rho,\pi}^{m,\nu}(t) dt, \quad (2)$$

где $t_{\rho,\pi,H}^{m,\nu}$, $t_{\rho,\pi,K}^{m,\nu}$ – времена начала и окончания использования ресурса ρ элемента π при реализации варианта ν мероприятия m .

Как правило, для выполнения задач в рамках варианта мероприятия назначается определенное количество вида ресурса, и на протяжении всего мероприятия оно остается неизменным. В связи с этим возможно выражение (2) представить в упрощенном виде



$$\Theta_{\rho,\Sigma}^{m,\nu} = \sum_{\pi=1}^{\Pi} R_{\rho,\pi}^{m,\nu} \cdot \Delta T_{\rho,\pi}^{m,\nu}, \quad (3)$$

где $R_{\rho,\pi}^{m,\nu}$, $\Delta T_{\rho,\pi}^{m,\nu}$ – количество и интервал использования ресурса ρ элемента π при выполнении варианта ν мероприятия m .

На рис. 1 цветом обозначены следующие действия с ресурсом:



– доставка (прибытие, убытие) ρ -го ресурса подразделений $\pi + 1$, $\pi + 2$ в район выполнения ν -го варианта мероприятия m ;

-  – использование ρ -го ресурса подразделений $\pi, \pi + 1, \pi + 2$ в ν -м варианте мероприятия m ;
-  – восстановление ρ -го ресурса подразделения π при выполнении мероприятия m .

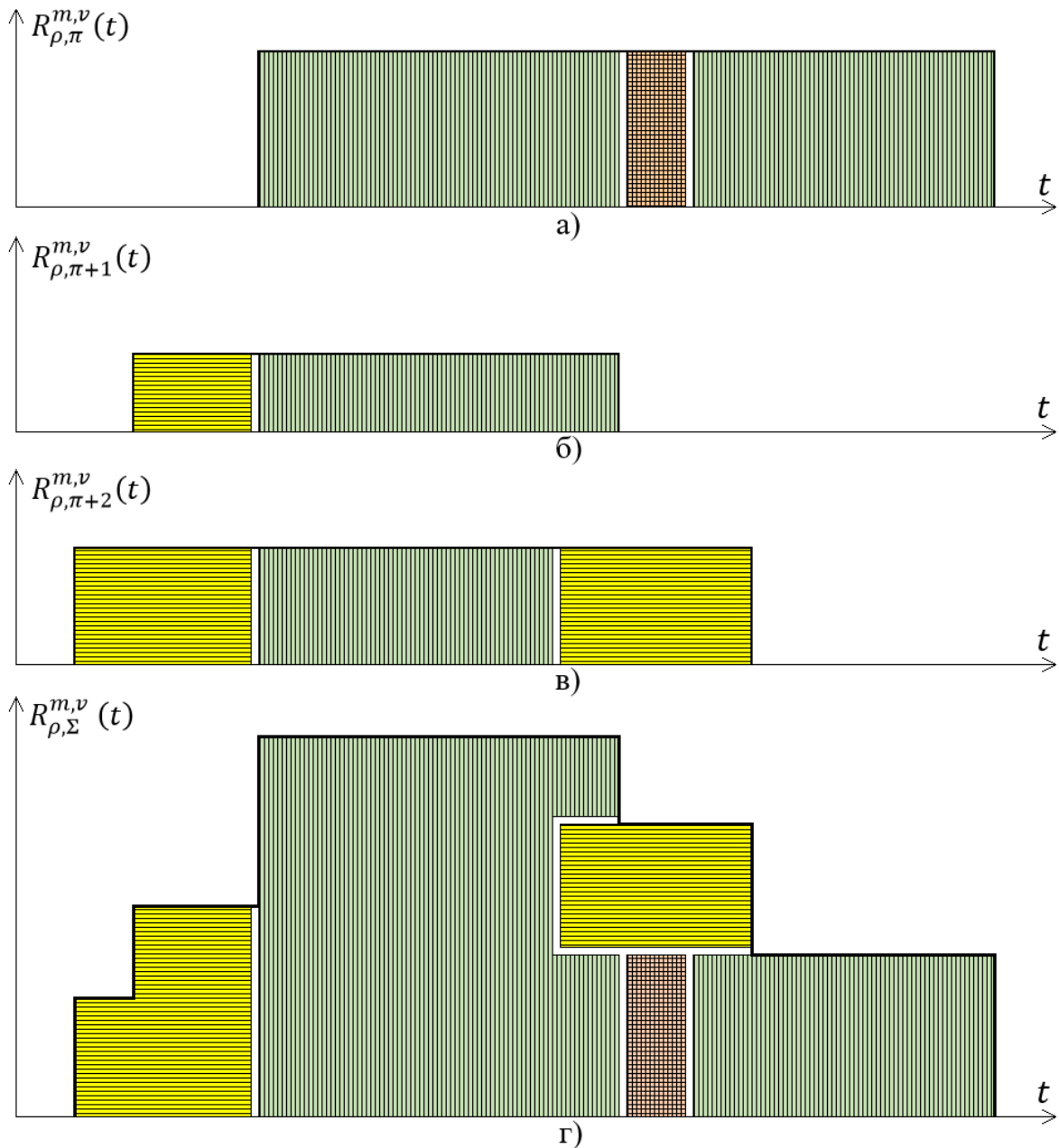


Рис. 1. Графики использования ресурса r в мероприятии m , где $R_{\rho, \pi}^{m, \nu}(t), R_{\rho, \pi+1}^{m, \nu}(t), R_{\rho, \pi+2}^{m, \nu}(t)$ – графики использования ρ -го ресурса, принадлежащего элементам с индексами $\pi, \pi + 1, \pi + 2$, при реализации ν -го варианта m -го мероприятия; $R_{\rho, \Sigma}^{m, \nu}(t)$ – суммарный график использования ρ -го ресурса в ν -м варианте m -го мероприятия

С учетом выражений (1) и (3) формула для расчета ресурсоемкости в матричном виде будет иметь следующий вид:

$$\Theta_{\Sigma}^{m, \nu} = \text{diag}((R^{m, \nu})^T \cdot T^{m, \nu}) \tag{4}$$

где $\Theta_{\Sigma}^{m,v}$ – матрица-столбец, элементы которой являются ресурсоемкостями мероприятия m по соответствующему виду ресурса, построчно равные диагональным элементам результирующей матрицы произведения $(R^{m,v})^T \cdot T^{m,v}$

$$\Theta_{\Sigma}^{m,v} = [\Theta_{1,\Sigma}^{m,v} \quad \dots \quad \Theta_{\rho,\Sigma}^{m,v} \quad \dots \quad \Theta_{P,\Sigma}^{m,v}]^T; \quad (5)$$

$R^{m,v}$ – матрица ресурсов элементов ОТС, используемых при выполнении варианта v мероприятия m ,

$$R^{m,v} = K^{m,v} \cdot R_o. \quad (6)$$

При этом

$$K^{m,v} = \begin{bmatrix} K_{1,1}^{m,v} & \dots & K_{1,\rho}^{m,v} & \dots & K_{1,P}^{m,v} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ K_{\pi,1}^{m,v} & \dots & K_{\pi,\rho}^{m,v} & \dots & K_{\pi,P}^{m,v} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ K_{\Pi,1}^{m,v} & \dots & K_{\Pi,\rho}^{m,v} & \dots & K_{\Pi,P}^{m,v} \end{bmatrix}, \quad T^{m,v} = \begin{bmatrix} T_{1,1}^{m,v} & \dots & T_{1,\pi}^{m,v} & \dots & T_{1,P}^{m,v} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ T_{\rho,1}^{m,v} & \dots & T_{\rho,\pi}^{m,v} & \dots & T_{\rho,P}^{m,v} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ T_{P,1}^{m,v} & \dots & T_{P,\pi}^{m,v} & \dots & T_{P,P}^{m,v} \end{bmatrix},$$

Здесь $K^{m,v}$ – матрица коэффициентов ресурсов элементов ОТС, используемых при выполнении варианта v мероприятия m ;

$T^{m,v}$ – матрица интервалов использования ресурсов при выполнении варианта v мероприятия m .

Критерии оценивания эффективности управления по ресурсоемкости мероприятия устанавливаются с учетом специфики выполняемых мероприятий и востребованности отдельных видов ресурсов. Самым простым из возможных критериев оценивания эффективности управления по ресурсоемкости мероприятия будет минимальное значение этого частного показателя среди рассматриваемых вариантов выполнения мероприятия. Для этого проводится поэлементное сравнение ресурсоемкости различных вариантов выполнения мероприятия с учетом экспертного ранжирования видов ресурсов. Тогда

$$(\Theta_{\rho,\Sigma}^{m,1}, \dots, \Theta_{\rho,\Sigma}^{m,V_m}) \rightarrow \min, \quad (7)$$

где V_m – количество вариантов мероприятия m .

Пример визуализации процесса сравнения вариантов выполнения мероприятия по ресурсоемкости с использованием экспертного ранжирования видов ресурсов представлен в табл. 1. При составлении таблицы принято, что ранг (значимость) вида ресурса убывает с увеличением условного порядкового номера.

Таблица 1

Пример визуализации процесса сравнения вариантов выполнения мероприятия по ресурсоемкости с использованием экспертного ранжирования видов ресурсов

Ресурсоемкость по всем видам ресурсов	Вариант, v			
	1	2	3	4
$\Theta_{1,\Sigma}^{m,v}$	20	20	27	31
...
$\Theta_{\rho,\Sigma}^{m,v}$	14	23	20	13
...
$\Theta_{P,\Sigma}^{m,v}$	34	32	34	31

В рассмотренном примере сравнение ресурсоемкости по первому виду ресурса приводит к неопределенности с предварительным выбором первого и второго вариантов реализации мероприятия. Предпочтительный выбор первого варианта осуществляется после сравнения значений ресурсоемкости по ресурсу ρ . Следует отметить, что меньшее значение ресурсоемкости второго варианта выполнения мероприятия по ресурсу P , по сравнению с первым, не приводит к необходимости изменения предпочтения, поскольку в соответствии с принятым порядком ранг этого вида ресурса ниже.

Далее рассмотрим основные выражения для расчета оперативности управления переводом ОТС.

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНИВАНИЮ ПЕРЕВОДА ОТС ПО ПОКАЗАТЕЛЮ «ОПЕРАТИВНОСТЬ УПРАВЛЕНИЯ»

Процесс управления переводом ОТС организуется заблаговременно и до начала деструктивных воздействий по ее элементам, как правило, он осуществляется в плановом порядке. После деструктивного воздействия по элементам ОТС во многих случаях в кратчайшие сроки требуется коррекция (уточнение) существующих решений, планов. В период уточнения решения, коррекции планов значительно увеличивается нагрузка на орган управления ОТС. Оценить составляющую эффективности управления переводом ОТС в условиях деструктивных воздействий по ее элементам, связанную с работой органа управления, позволяет частный показатель – оперативность управления.

Поскольку после деструктивного воздействия на элементы ОТС, участвующие в выполнении мероприятий перевода, понадобится время на уточнение решения, коррекцию планов, подготовку и выполнение мероприятия уточненным способом, необходимо определить максимально допустимый интервал времени на выполнение мероприятия:

$$T_{\max}^m = t_K^m - t_B, \tag{8}$$

где t_K^m – установленный (допустимый) срок выполнения мероприятия;
 t_B – время получения органом управления ОТС информации о деструктивном воздействии.

В качестве нормирующего интервала для расчета оперативности управления в относительных величинах целесообразно использовать резерв времени на выполнение мероприятия. При этом должно выполняться условие его превышения над необходимыми затратами времени на работу органа управления:

$$\begin{cases} T_R^{m_v} = T_{\max}^m - T_G^{m_v} - T_Z^{m_v}; \\ T_R^{m_v} > \max_{f \in (1..F)} \left(\sum_{u_f=1}^{U_f^{m_v}} T_{u_f}^{m_v} \right). \end{cases} \tag{9}$$

где $T_R^{m_v}$ – резерв времени на выполнение мероприятия;
 T_{\max}^m – максимально допустимый интервал времени на выполнение мероприятия m ;
 $T_G^{m_v}$ и $T_Z^{m_v}$ – интервал времени на подготовку и выполнение задач подчиненными подразделениями по варианту v мероприятия m ;
 $T_{u_f}^{m_v}$ – интервал времени на выполнение u_f -й операции управления в процессе работы f -го подразделения органа управления при планировании выполнения мероприятия m по варианту v ;
 F – количество подразделений органа управления;

$U_f^{m_v}$ – количество операций управления, выполняемых в процессе работы f -м подразделением органа управления при планировании выполнения мероприятия m по варианту v .

С учетом формулы (9) выражение для расчета оперативности управления при перепланировании выполнения мероприятия m по варианту v преобразуется к следующему виду:

$$O^{m_v} = 1 - \frac{\max_{f \in (1..F)} \left(\sum_{u_f=1}^{U_f^{m_v}} T_{u_f}^{m_v} \right)}{T_R^{m_v}}. \quad (10)$$

При необходимости уточнения решения и коррекции планов выполнения нескольких мероприятий (M_w) оперативность управления можно рассчитать, используя выражение

$$O^{M_w} = 1 - \frac{\max_{f \in (1..F)} \left(\sum_{m_w=1}^{M_w} \sum_{u_f=1}^{U_f^{m_w}} T_{u_f}^{m_w} \right)}{\max_{m_w \in (1..M_w)} (T_R^{m_w})}. \quad (11)$$

Областью значений оперативности управления является интервал (0;1].

Критерием для сравнения разработанных вариантов выполнения мероприятия являются максимальные значения оперативности управления

$$(O^{m_1}, \dots, O^{m_{v_m}}) \rightarrow \max. \quad (12)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование предложенных в статье частных показателей (оперативности управления и ресурсоемкости мероприятий) позволяет адекватно оценить эффективность управления переводом организационно-технической системы военного назначения. Адекватность определяется использованием для оценивания перевода ОТС показателей, характеризующих наиболее значимые его составляющие: ресурсоемкость разработанных органом управления вариантов выполнения мероприятий и оперативность работы органа управления при деструктивных воздействиях на элементы ОТС.

Список используемых источников

1. Петухов А. М., Холодок А. Ю. Усовершенствованный алгоритм повышения готовности организационно-технической системы военного назначения к решению задач по предназначению в изменяющихся условиях обстановки // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2023. – Вып. 683. – С. 28–35.
2. Казахов Б. Д., Марченко М. В., Петухов А. М. Особенности управления организационно-технической системой военного назначения при воздействии дестабилизирующих факторов // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2021. – Вып. 678. – С. 17–22.

Bugaichenko P. Y., Privalov A. E. Model of homeostatic control of orbital system for monitoring the space situation // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 687. – P. 7–15.

The article solves the task of developing a model of a system of homeostatic control of an orbital system for monitoring the space situation (OSMSS), which is capable of control the process of monitoring the space situation based on the balance between the processes of obtaining and obsolescence of the information. Mathematical formulation of the problem of homeostatic control of OSMSS was carried out. An entropy of the space situation was proposed as an indicator of the efficiency of the management of OSMSS, and a mathematical model of the efficiency indicator was developed. The process of OSMSS functioning as a counteraction between two antagonistic processes - obtaining and obsolescence of information on objects of space debris - is described. A model of a system of homeostatic control of OSMSS in the form of a balanced homeostate was proposed, the structure of further studies aimed at implementing a homeostatic approach to control of OSMSS was substantiated.

Key words: monitoring of the space situation, space debris, homeostatic control, entropy.

A method for creating parallel special software with time parameterization of multiprocessor computing systems with the same access to memory / D. S. Viktorov, A. S. Kalachnikov, A. A. Tolmachev, A. L. Feder // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 687. – P. 16–26.

A method for creating parallel special software with time parameterization of multiprocessor computing systems with the same access to memory is presented, which allows to obtain a rational version of parallel special software with time parameterization from sequential programs in C++, taking into account the costs of additional development of special software.

Key words: parallel special software, time parameterization, multiprocessor computing system with the same access to memory.

Integer programming method for minmax assignment problem solution in automated control of a complex organizational and technical system / V. I. Gorbulin, P. V. Gorbulin, A. V. Statkevich, I. A. Fadin // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 687. – P. 27–36.

Article contains a review of assignment problems practical applications, formulations, solution methods and algorithms. These problems solution methods and algorithms have a wide variety. Minmax appointment problem aka bottleneck problem significant differences are denoted. This task has a property of optimal solution non-uniqueness because of weak ordering of plans in ascending order of the objective function. This non-uniqueness presents additional opportunities for multi-criteria optimization. Authors developed new original method of assignment problem solution for the case when every servicer can have only one appointment and offered a modification of known Hungarian method of appointment problem solution for additive objective function.

Key words: appointment problem, Minmax objective function, bottleneck problem, plans weak ordering, optimal plan, multitude of possible appointments, list of possible appointments.

Volodin R. S., Komissarov A. V., Tarakanov M. N. Evaluation of a potential realizable detection zone of emitting ballistic objects on signals of terrestrial non-cooperated radiation sources // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 687. – P. 37–43.

The article assesses the potential realizable detection zone for ballistic objects with a special receiving device based on signals from ground-based non-cooperative radiation sources.

Key words: ground-based non-cooperative radiation source, special receivers, ballistic object, direct and reflected signal, detection zone, effective scattering area, Cassini ovals.

The influence of climatic factors on the amplitude-phase field distribution at the digital antenna array aperture / A. M. Golik, E. R. Dashkin, D. V. Sergeev, Y. A. Shishov // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 687. – P. 44–49.

A system for correcting distortions of the amplitude-phase distribution at the aperture of the digital antenna array caused by the influence of snow and ice coatings is proposed. Improving the accuracy of correction of the amplitude-phase distribution distortion is based on the fact that when forming the reference values of complex amplitudes, errors of the calculation method associated with inaccurate knowledge of the shapes of the directional pattern of the auxiliary antenna and the emitters of the digital antenna array, the distances between their phase centers, as well as the unaccountable influence of electromagnetic wave reflections from the earth's surface and local objects are excluded.

Key words: digital antenna arrays, amplitude-phase distribution, operation of location systems, difficult climatic conditions.

Golyakov A. D., Sasunkevich A. A., Fominov I. V. Justification of instrument composition and accuracy requirements for the measuring instruments of the autonomous navigation system of a space robot // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 687. – P. 50–60.

Based on the studies performed on the basis of mathematical modeling, the instrument composition and requirements to the accuracy of the measuring instruments of the autonomous navigation system of the space robot are substantiated. The scope of the space robot's application is a set of service operations with serviced spacecraft.

The results of the research into the accuracy of functioning of the autonomous navigation system of a space robot are presented, assuming that the measurement results of on-board vehicles contain errors which are distributed according to the normal law. The characteristics of the law of distribution of measurement errors retain their values during the navigation session.

The presented results can be used when choosing the shape of autonomous navigation system of a space robot intended for solving service tasks in the orbit, and solving the problem of selection and justification of on-board measuring instruments of navigation parameters.

Key words: space robot; autonomous navigation system; errors of measuring instruments; requirements to accuracy parameters; mathematical simulation

Synthesis of Control for Spherical Motion of Equal Radius Orbits Interacting Spacecraft / V. I. Gorbunin, A. A. Matveyev, S. A. Polyakov, I. A. Fadin // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 687. – P. 61–71.

An algorithm has been developed and analytical relations have been obtained for synthesis of control for spherical motion of equal radius orbits interacting spacecraft. The algorithm proposed is based on the fact that the line connecting two space objects moving in equal radius circular orbits moves parallel to the pseudoequator plane resting in inertial space. The task of control synthesis is divided into two subtasks: reorientation of the spacecraft axis from the previous spacecraft to the next one and tracking of the later. The solution proposed makes it possible to synthesize an optimal control according to the criterion of minimum energy consumption.

Key words: movement around the center of mass, spherical motion, management, spacecraft.

Moryakov S. I. The method for obtaining radar cross section of objects via near field wideband measurements // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 687. – P. 72–79.

The method for obtaining radar cross section of objects via near field wideband measurements is proposed. Near field to far field transform based on ISAR images correction. RCS extraction

obtaining via independent scattering object model. The simulation and experiment results is proposed.

Key words: radar cross section, inverse synthetic aperture radar images, wideband measurements.

Alekhin S. G., Ivanov R. D., Shemelov V. A. Estimates of empirical methods for predicting the height of the lower cloud boundary for the St. Petersburg region // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 687. – P. 80–86.

The studies of predecessors in the field of forecasting the height of the cloud base (CLB) in the absence of instrumental meteorological measurements are summarized. The results of numerical experiments on estimating the climatic characteristics of this cloudiness parameter for the region of St. Petersburg are presented. The practical applicability of empirical methods for forecasting VNGO is shown, taking into account the physical and geographical conditions of the forecasting area and the season of the year.

Key words: cloud base height, empirical methods, forecast of meteorological conditions.

A model of distortions of coordinate space CS-42 for high precision coordinate conversion to the GP-90.11 system / A. V. Astapovich, A. S. Zuev, D. A. Kunichkin, A. V. Prokofjev // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 687. – P. 87–101.

This article substantiates the approach to solving the problem of high-precision coordinate transformation between GP-90.11 and CS-42. Analyzing the relationship between coordinate systems and different forms of representing the position of a point in space, the authors come to the conclusion that it is advisable to represent the model of coordinate space distortions by the angles between the normals to the reference ellipsoids, which, like the deviation of plumb lines, should be represented in the meridian and the first vertical. Particular attention is paid to the algorithm for constructing a digital model of distortions of the CS-42 geodetic network and the study of non-orthogonal deformations of the coordinate space by geostatistical methods. Based on an experimental study for different conditions of the trend line behavior data set, it was concluded that extrapolation does not allow excluding errors in the transformed coordinates in an inaccessible area. To represent in a single high-precision coordinate space geodetic and cartographic data obtained by satellite methods of space geodesy, remote sensing and classical methods of ground geodesy, the authors propose in the materials created on the basis of the deformed coordinate system CS-42, to exclude non-orthogonal distortions by geostatistical methods, and the transformation of geodesic and cartographic data, executed in GP-90.11, to perform orthogonal transformations using global parameters..

Key words: geostatistics, coordinate space, nonlinear transformation, coordinate system, digital distortion model, digital correction model.

Nikulshin B.Y., Novikov A. V., Timoshchuk A. S. Application of meteorological radiosonde shells with suspended vision equipment // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 687. – P. 102–111.

The article presents the results of studies of the possibility of using radiosonde shells to lift the vision equipment into the atmosphere to the required height using the example of a course camera (FPV) for observing the underlying surface. Recommendations are given on the use of technical means from the composition of radar mobile meteorological complexes for launching radiosonde shells equipped with vision equipment.

Key words: meteorological radiosonde shells, vision equipment, radar mobile meteorological complex.

Biryukov D. N., Dudkin A. S., Shestakov I. A. An approach to improving the explainability and interpretability of decisions made by an intelligent system // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 687. – P. 112–119.

The necessity of increasing confidence in solutions generated by artificial intelligence systems is indicated. An approach to the construction of an intelligent system that allows interpreting the decisions made by it is proposed. The considered approach to building an intelligent system is based on the idea of combining neural network and ontological processing of incoming data.

Key words: intelligent system, artificial intelligence, neural networks, deep learning, "black box", explainability, interpretability, ontology.

Biryukov D. N., Timashov P. V., Chernishov V. I. Method for identification of potentially dangerous states of electronic document flow configuration using associative resource network // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 687. – P. 120–128.

A method for identifying potentially dangerous states of the configuration of electronic document management using an associative resource network is proposed, which makes it possible to determine the most critical elements of the organizational and technical system that can be selected by an internal intruder as potential objects for exposure and distribution of malicious software using electronic documents.

Key words: information protection, malicious software, computer attacks, information security.

Lomako A. G., Menisov A. B. An approach to assessing the quality risk of the aesthetics of artificial intelligence systems based on association analysis // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 687. – P. 129–137.

The introduction of artificial intelligence systems (AI) into critical infrastructure facilities requires a comprehensive analysis of constantly emerging computer attack threats. In recent years, attackers have improved their tactics and techniques in carrying out computer attacks on AI. The scientific and technological field of reliable development and operation of AI has encountered problems in the administration of the protection of such systems and their components. The subject of the study is the area of assessing the risks of reducing the quality of functioning of critical information infrastructure objects containing AI. The novelty of the developed approach lies in the possibility of improving the accuracy, reliability and justification of determining and predicting the risks of reducing the quality of the functioning of interdependent components of AI of various architectures. The approach involves the collection and processing of data on the implementation of computer attacks on AI components, the search for attribute types of attackers' tactics and techniques, the analysis of associations, and the determination of the relationship with the components of the surrounding infrastructure. The main results are to provide the ability to determine the granularity of the potential profile of a computer attack on AI, using algorithms for searching association rules for risk assessment. The article describes the results of the experiment to determine the risks of reducing the quality of the functioning of the AI, the initial data for which are the descriptions of computer attacks MITER ATT&CK. The results obtained using the Apriori algorithm demonstrated that the idea of using association analysis can be applied in the formation of a basis for solving the problem of protecting AI after computer attacks.

Key words: information security, artificial intelligence system, risk assessment, data analysis, association rules.

Ovcharov V. A., Podshibyakin A. S. Technology to protect mobile wireless devices from tracking attacks // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 687. – P. 138–146.

Currently, mobile wireless devices (MDW) use unencrypted channels to exchange service data with other devices. In order to prevent tracking of the public channels in use, MDW use a periodically changing random identifier instead of a fixed MAC address (Media Access Control, MAC). The article shows that MDW that support Bluetooth 4.0 and higher specifications are vulnerable to passive location identification attacks, as a result of which an intruder can extract identifying tokens from the message payload, including for subsequent access to the device. An original algorithm has been developed to prevent unauthorized identification of the location of Windows, Linux and Android devices that support Bluetooth Low Energy (BLE) technology.

Key words: unauthorized location identification, privacy, information leakage, side channels, MDW, IoT devices, traffic analysis.

Solovyov I. A., Trofimova N. A. Technology for analyzing events and threats to information security of industrial control systems based on the application of an attack activity model to network traffic data // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 687. – P. 147–160.

The publication presents a technology for analyzing information security events and threats to components of industrial control systems, which determines the order of application of the attack activity model for identification and subsequent correlation of violators' actions into activity groups characterized by a functional implementation platform. A feature of this solution is the ability to determine the composition of typical threats based on the results of network traffic analysis, as well as their prioritization according to the available potential to have a destructive impact on the target infrastructure.

Key words: industrial control systems, information security events, network traffic analysis, attack activity model, activity groups, intruder's functional platform, typical security threats.

The concept of relocated technical complexes for preparing for the launch of ultra-small spacecraft / A. A. Abdurakhimov, V. V. Duga, I. O. Kukushkin, M. M. Poluyan // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 687. – P. 161–168.

The article substantiates the expediency and possibility of creating relocated technical complexes that are part of ground-based mobile space complexes. The issue of terminology is considered, the basic principles for the creation of relocated technical complexes are determined.

Key words: ultra-small spacecraft, ultra-light carrier rocket, relocated technical complex, mobile space complex.

Arseniev V. N., Klyuchkin A. K. Formation of requirements to the accuracy characteristics of measuring tools of the selection system of a space vehicle intended for monitoring of space debris // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 687. – P. 169–177.

The problem of determining the requirements for the accuracy characteristics of measuring instruments used on board a spacecraft designed to monitor space debris is considered in order to solve the problem of choosing the most dangerous man-made object from a variety of observables. The problem is solved based on the use of the previously introduced combined feature, which represents a linear convolution of particular features that characterize the observed space objects. The proposed approach makes it possible to obtain a solution to the problem of choosing the most dangerous man-made object with the required probability, as well as to redistribute the requirements for the errors of measuring instruments, taking into account the possibility of their technical implementation. An illustrative example is given.

Key words: near-Earth space, man-made objects, partial and combined indicators, measuring instruments, accuracy characteristics, formation of requirements.

Vedernicov M. V., Lyashevsky A. V., Prokopenko E. A. Methodical approach to assessing the possibility of operation solid-propellant engines with mechanical defects // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 687. – P. 178–187.

The article discusses a variant of methodological support for the prompt adoption of an informed decision on the possibilities of the safe use of solid-propellant missiles with mechanical defects. As a criterion for rejecting solid-propellant rocket engines are chosen limitations on the size of defects in the form of cracks on the body and in solid-propellant charge. Estimating the state of a solid-propellant is based on the calculated relations for elliptical cracks and stress concentration regions.

Key words: solid-propellant rocket engine, solid fuel charge, crack, stress intensity factor.

Ivanyu A. Y., Kopkin E. V., Myshko V. V. Reliability assessment of checks with an interval form of diagnostic signs representation // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 687. – P. 188–198.

It is proposed a multi-alternative procedure for assessing the reliability of checks with diagnostic signs having an interval form of representation provided that the number of such checks possible outcomes can be significantly more than two and in the absence of information about probabilities values of first and second kind. An example of procedure realization is given.

Key words: technical state, diagnostic sign, reliability of diagnosis.

Karagodin V. V., Prishchepa D. N., Rybakov D. B. A comprehensive approach to determining reliability and the survivability of power supply systems special objects // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 687. – P. 199–204.

Reliability and survivability of power supply systems providing special ground-based facilities with electric energy are important components of their quality, ensuring the effectiveness of solving tasks by special objects for their intended purpose, both in everyday and combat conditions. The article considers a comprehensive approach to defining the concepts of reliability and survivability of power supply systems for special objects as large complex systems of cybernetic type. The interrelation of these concepts is determined. It is noted that for special objects, the concept of reliability is an internal complex property of power supply systems that characterizes their daily functioning, whereas the property of survivability of the system manifests itself only in the presence of external or internal influences (disturbances).

Key words: Power supply systems, reliability, types and indicators of reliability, survivability, survivability properties, durability, stability and recoverability, the relationship of indicators.

Kozlov V. V., Lagun A. V., Kharchenko V. A. Integral quality mechanically objects of the space rocket complex // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 687. – P. 205–214.

This article outlines and substantiates the principles for evaluating the appearance of a space rocket complex by a combination of several criteria converted into an integral quality indicator for mechanical objects included in its structure. In addition, the article outlines approaches for assessing their structural perfection, stability, controllability and self-organization.

Key words: mechanical objects of the space rocket complex, space rocket system, structural perfection, controllability, self-organization, stability, quality indicator, appearance of the space rocket system, integral quality.

Kryzhanovskiy V.I., Slatov S.V., Trofimov I.A. Algorithm for forming control actions to transfer a controlled object to a given state in a finite number of discrete periods // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 687. – P. 215–225.

A modification of the algorithm for generating a sequence of control pulses for discrete control with amplitude-pulse modulation was carried out to transfer the control object from an arbitrary initial state to a final state for a given number of discrete periods. The problem in the original formulation is reduced to the solution of a linear programming problem. The developed modified algorithm differs from the known ones by a significant reduction in the dimension of the linear programming problem to reduce the cost of computational processes.

Key words: discrete control, finite number of steps, linear programming problem.

Mosyagin R. A., Tupicsin Y. E., Shishkin E. V. Mathematical model of multi-criteria choice of alternatives for restoring the operability of technical systems in emergency situations // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 687. – P. 226–232.

The formulation of the problem of multi-criteria choice of the option of performing restoration work from a variety of possible ones is considered. The selection criteria are set in the form of a set of work performance goals. The selection is carried out by a group of experts, therefore, the task of individual and then group selection is initially solved. Selection algorithms based on the Pareto principle, convolution of preference functions, the method of sum of ranks, fuzzy integral, spectral method are considered.

Key words: multi-criteria choice, multiple goals and alternatives, Pareto principle, convolution of preference functions, rank sum method, fuzzy integral, spectral method.

Besedin S. M., Erofeev A. V., Katcik V. O. Formation of cadets' readiness to work as part of training calculations during tactical and special exercises. // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 687. – P. 233–238.

Based on the experience of conducting practical classes and exercises, the article suggests methods for forming cadets' readiness to work as part of training calculations during a tactical and special exercise to perform military unit tasks for their intended purpose.

Key words: tactical and special training, readiness, coordination, interaction, training calculations.

Bulekbaev D. A., Morozov A. V. On the issue of teaching ordinary differential equations in a technical university // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 687. – P. 239–248.

The main tasks of studying differential equations are: 1) finding all solutions of a given equation and 2) studying their properties. The second task often remains unsolved in technical universities due to problems of lack of study time (in some cases it is simply omitted). On the other hand, the form of the obtained general solution (general integral) can be so cumbersome that its analysis becomes boundless and sometimes impossible, and, consequently, the resulting formula is useless. In such cases, it remains to look for another approach to the study, in particular, to resort to numerical integration of differential equations and comparison (verification) of the analytical solution formula with numerical calculation. In this combination of two approaches, the educational effect as a whole increases. This article proposes a methodology based on an integrated approach to conducting practical exercises on the topic "Ordinary differential equations", including both an analytical solution and a numerical one. Note that the use of elements of numerical integration with visualization of the solution in the course of differential equations makes the presentation of differential equations much deeper and meets modern requirements for learning. The problem under discussion is illustrated by three examples.

Key words: learning to study differential equations, equivalent forms of first-order differential equations, analysis of properties of integral curves by qualitative methods, analysis of properties of integral curves on a plane using PC.

Goncharevsky V. S. Leningrad Red Banner Air Force Engineering Academy and features of training in it in the late 40s and early 50s of the XX century // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A.F. Mozhaisky, 2023. – Release 687. – P. 249–255.

Three hundred and ten years ago, on December 16, 1712, by decree of Emperor Peter I, the first polytechnic educational institution in Russia was established - the Military Engineering School, which was the forerunner of the modern Military Space Academy named after A. F. Mozhaisky. For more than three centuries of its existence, this educational institution has repeatedly changed its name, the profile of graduate training has repeatedly changed, but the high quality of its students remained an invariable feature, an integral attribute of the educational institution. This was achieved by the fact that this educational institution has always had and currently has a highly qualified teaching staff, and its leadership and command have constantly carried out and are currently doing very effective work on the development and improvement of the educational process. The article analyzes some features of the organization of this process during the period when the Academy was a Military Air Force and trained specialists for the domestic Air Force. Brief information is provided about the unique educational unit of the Academy of that period – the so-called Consolidated Course, which, despite the relatively short period of its operation, made a very significant contribution to the training of highly qualified military specialists.

Key words: academy, faculty, Consolidated course, faculty course, educational process.

Kuzhekin N. S., Myshko V. V., Chikurov V. A. Problems of optimizing the technology of training cadets during classes in military special disciplines // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 687. – P. 256–261.

The article discusses the main problems that may arise in the process of conducting educational activities when conducting classes with cadets in military special disciplines. Some ways to solving them are proposed by choosing learning technologies in order to optimize the teaching methods.

Key words: military special disciplines, learning technologies, optimization of learning technology.

Inozemtseva L. A., Kuzhekin N. S. Dynamics of the cognitive motivation system in the process of becoming 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, 2023. – Release 687. – P. 262–266.

The publication discusses the actual problems of the development of cognitive motivation as one of the key components in the process of professional formation of a teaching staff of a military educational institution, it is proposed to develop a system of cognitive motivation in the course of professional retraining and advanced training of teaching staff.

Key words: cognitive motivation, motivation of professional activity, professional improvement, professional retraining, professional development.

Naumenkova E. O. The role of the British information "machine" in inciting Russophobia during the Russian-Turkish War of 1877-1878 // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 687. – P. 267–275.

The article discusses the description of the events of the Russian-Turkish War of 1877-1878 by British periodicals of various orientations (conservative, liberal, Catholic, provincial). Based on the materials studied, it is concluded that during this period almost the entire press was anti-Russian, and conservative and Catholic newspapers openly adhered to Russophobic and pro-Turkish views. The press materials show the problem of forming anti-Russian public opinion through the publication of articles depicting soldiers of the tsarist army as murderers and barbarians who exterminated civilians both during the war with the Ottomans and during the suppression of the

Polish uprising of 1863. We see the reasons for anti-Russian sentiments in Britain's desire to preserve the integrity of the Ottoman Empire as a counterweight to Russia in the Balkans, as well as in the event of an escalation of the conflict and a possible war to demonize and dehumanize the image of a potential enemy. The article examines the attitude of the press to the conditions of peace between the warring parties, as well as the attitude of publications of various orientations to the possible entry of Britain into the war against Russia.

Key words: Great Britain, Russophobia, Russian-Turkish war of 1877 – 1878, press.

Ogorodnikov V. P. The problem of the philosophical foundations of science // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 687. – P. 276–283.

In the perspective of the main sections of philosophical knowledge - ontology, epistemology and logic, the main functions of philosophy in relation to scientific knowledge are considered. The heuristic value of the basic laws and principles of development is shown. In the context of various interpretations of the discoveries of modern natural science, the inconsistency of subjective-idealistic (especially positivist), objective-idealistic and metaphysical (anti-dialectical) paradigmatic attitudes is demonstrated. The enduring relevance and effectiveness of dialectical-materialist methodology for all spheres of scientific knowledge is argued.

Key words: worldview, methodology, materialism, dialectics, idealism, metaphysics, truth and its criterion, positivism, determinism.

Experimental study of the influence of the parameters of the excitation impulses of secondary monitoring equipment on the suppression of higher harmonics of resonators of string converters / N. N. Gusev, A. O. Kucherenko, D. P. Mandrica, V. O. Maslov // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 687. – P. 284–297.

The article is devoted to the study of the dependence of the degree of suppression of the amplitude of the higher harmonics of string oscillations of the string transducer on the parameters of the excitation pulse of the secondary equipment of monitoring systems for industrially dangerous, technically complex and unique objects, including ground-based space infrastructure objects. The experiment was conducted on prototypes of string transducers, in the design of which the technical solutions according to patents 2685803, 2777515 and 2794285 of the Russian Federation, as well as serially produced string transducers PSAS-40, AD-40, GD-4 are realized. The paper presents the results of theoretical and experimental studies showing the influence on suppression of the amplitudes of higher harmonics of string oscillations of the parameters of excitation pulses of the secondary equipment of monitoring systems. The contribution of each of the excitation pulse parameters to the formation of the resulting amplitude of its oscillations is analyzed. The relationship between the measurement error of the informative parameter of the string transducer - the frequency of the main tone oscillation - and the parameters of the excitation pulses of the secondary equipment of monitoring systems is established. The article suggests ways of extending the range of measuring parameters of stress-strain state of building structures of industrially dangerous, technically complex and unique objects by means of string transducers.

Key words: technical condition control systems, monitoring, primary string transducer, force pulse amplitude, string oscillation amplitude, stress-strain state, secondary equipment.

Study of the strength and deformation characteristics of heat-resistant foam concrete at elevated temperatures / Y. A. Kamenev, S. S. Ryabova, A. S. Solomakhin, A. M. Sycheva // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 687. – P. 298–304.

The paper considers the possibility of using heat-resistant fiber foam concrete as a heat-resistant material in the design of the gas duct of the launch facility. The values of the deformation diagram

for samples of heat-resistant foam concrete based on fiberglass are presented with an increase in temperature to 400 °C. It has been proved that the developed material was not destroyed by the impact of combustion products of a rocket engine simulating the gas-dynamic impact from a rocket launch.

Key words: heat-resistant foam concrete, special construction, deformative properties, flue, starting structure, heat-shielding material, basalt fiber, gas-dynamic effect.

Soldatenko T. N., Tyurin E. A. Methodology for assessing the level of accident risk reinforced concrete structure of the starting structures for permanent wear // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 687. – P. 305–310.

A methodology for assessing the level of accident risk of a reinforced concrete structure of a launch facility is presented based on the identification of the category of technical condition in which the structure is located for a given operating time. Obtaining an estimate of this indicator is based on the results of a previously conducted survey. The results obtained are illustrated by a computational example.

Key words: risk level, reinforced concrete structure, reliability index, wear constant.

Kozlov Y. V., Kukushkin M. A., Ponomarev D. Y. Proposals for improving the methodology for planning the use of spacecraft control tools // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 687. – P. 311–319.

The article proposes an improved methodology for planning the use of a special means for conducting operations of spacecraft management using a new algorithm for distributing applications for a spacecraft management operation, a multi-criteria approach is justified using previously unrecorded indicators for evaluating the effectiveness of the management process. The proposed approach allows solving the task of coordination planning in terms of multi-criteria uncertainty with an expanded composition of indicators for evaluating the effectiveness of the management process.

Key words: planning of the use of spacecraft controls, performance criteria.

Petukhov A. M., Kholodok A. Y. A methodological approach to assessing the translation management of a military organizational and technical system in different states under destructive impacts on its elements // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 687. – P. 320–326.

The article describes a methodical approach to evaluating the management of the transfer of an organizational and technical system for military purposes into various states under destructive influences on its elements, in particular, using indicators of the resource intensity of transfer events and management efficiency.

Key words: organizational and technical systems for military purposes, system evaluation.

Абдурахимов Алексей Александрович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); 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

Арсеньев Владимир Николаевич, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Астапович Анатолий Владимирович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Беседин Сергей Михайлович, кандидат военных наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Бирюков Денис Николаевич, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Бугайченко Павел Юрьевич, кандидат военных наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Булекбаев Дастанбек Абдыкалыкович, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-31.

Ведерников Михаил Васильевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Викторов Дмитрий Сергеевич, доктор технических наук, профессор; Военная академия воздушно-космической обороны имени Маршала Советского Союза Г. К. Жукова (170100, Россия, Тверь, ул. Жигарева, 50); тел.: 8 (910) 646-37-18, e-mail: viktorov.dmitry@yandex.ru

Володин Роман Сергеевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Голик Александр Михайлович, доктор технических наук, профессор; Санкт-Петербургский военный ордена Жукова институт войск национальной гвардии (198206, Россия, Санкт-Петербург, ул. Л.Пилутова, 1); e-mail: info@spvi.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.

Гончаревский Вилен Степанович, заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-62, 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) 237-12-49, e-mail: vka@mil.ru

Горбулин Павел Владимирович, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 237-12-49, e-mail: vka@mil.ru

Гусев Николай Николаевич, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Дашкин Эдуард Романович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); 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); 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).

Ерофеев Алексей Васильевич, кандидат военных наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Зуев Андрей Сергеевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Иванов Роман Дмитриевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13), тел.: 8 (812) 327-95-91, e-mail: vka@mil.ru

Иваню Анна Юрьевна, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Иноземцева Людмила Александровна, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Калачников Андрей Сергеевич, Военная академия воздушно-космической обороны имени Маршала Советского Союза Г. К. Жукова (170100, Россия, Тверь, ул. Жигарева, 50); тел.: 8 (910) 824-43-60, e-mail: androidus4@yandex.ru

Каменев Юрий Александрович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Карагодин Владимир Викторович, доктор технических наук, профессор; 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

Кацик Владимир Олегович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Ключкин Александр Константинович, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Козлов Владимир Владимирович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-19, e-mail: vka@mil.ru

Козлов Юрий Викторович, кандидат военных наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Комиссаров Алексей Викторович, кандидат военных наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Копкин Евгений Вениаминович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Крыжановский Владимир Иванович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Кужекин Николай Сергеевич, кандидат философских наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-96, 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); e-mail: vka@mil.ru

Кукушкин Михаил Александрович, кандидат военных наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Куничкин Дмитрий Анатольевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Кучеренко Александр Олегович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Лагун Андрей Валерьевич, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-19, e-mail: vka@mil.ru

Ломако Александр Григорьевич, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Ляшевский Александр Валерьевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Мандрица Дмитрий Петрович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Маслов Владимир Олегович, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Матвеев Алексей Анатольевич, кандидат военных наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 237-12-49, e-mail: vka@mil.ru

Менисов Артем Бакытжанович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Морозов Алексей Валентинович, кандидат физико-математических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-31.

Моряков Станислав Игоревич, кандидат технических наук; ЦНИИ ВКС Минобороны России (170026, Россия, Тверь, наб. Афанасия Никитина, 32); тел.: 8 (4822) 55-88-29, e-mail: nicrvotver@mil.ru

Мосягин Роман Александрович, кандидат политических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Мышко Василий Васильевич, 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

Науменкова Екатерина Олеговна, кандидат исторических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Никульшин Борис Юрьевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-76.

Новиков Александр Валерьевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-52.

Овчаров Владимир Александрович, доктор технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-59.

Огородников Владимир Петрович, доктор философских наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Петухов Анатолий Михайлович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-93-72, e-mail: vka@mil.ru

Подшибякин Александр Сергеевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-59.

Полуян Максим Михайлович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Поляков Сергей Алексеевич, Департамент Правительства Российской Федерации (103274, Россия, Москва, Краснопресненская наб., 2, стр.2); тел.: 8 (812) 237-12-49, e-mail: vka@mil.ru

Пономарев Дмитрий Юрьевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Привалов Александр Евгеньевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); 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

Прокопенко Евгений Алексеевич, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); 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); e-mail: vka@mil.ru

Рыбаков Дмитрий Вячеславович, 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

Рябова Светлана Сергеевна, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.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.

Сергеев Дмитрий Викторович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Слатов Сергей Валерьевич, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Солдатенко Тамара Николаевна, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-45, e-mail: vka@mil.ru

Соловьев Игорь Александрович, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 237-10-21.

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

Статкевич Александр Владимирович, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 237-12-49, e-mail: vka@mil.ru

Сычева Анастасия Максимовна, доктор технических наук, профессор; 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

Тараканов Михаил Николаевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Тимашов Павел Васильевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-87.

Тимошук Александр Сергеевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-52.

Толмачев Алексей Александрович, кандидат военных наук; Военная академия воздушно-космической обороны имени Маршала Советского Союза Г. К. Жукова (170100, Россия, Тверь, ул. Жигарева, 50); тел.: 8 (911) 707-39-17, e-mail: the_lexys@bk.ru

Трофимов Илья Анатольевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Трофимова Наталья Андреевна, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 237-10-21.

Тупицин Юрий Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Тюрин Евгений Анатольевич, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-45, e-mail: vka@mil.ru

Фадин Илья Алексеевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 237-12-49, e-mail: vka@mil.ru

Федер Александр Львович, доктор военных наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Фоминов Иван Вячеславович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-21.

Харченко Владимир Алексеевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-19, e-mail: vka@mil.ru

Холодок Александр Юрьевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-99-84, e-mail: vka@mil.ru

Чернышов Владимир Иванович, кандидат технических наук; НИИ информационной безопасности ВАГШ ВС РФ (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, 100).

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

Шемелов Владимир Александрович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 327-96-52, e-mail: vka@mil.ru

Шестаков Илья Алексеевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Шишкин Евгений Вячеславович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Шишов Юрий Аркадьевич, доктор технических наук, профессор; Санкт-Петербургский военный ордена Жукова институт войск национальной гвардии (198206, Россия, Санкт-Петербург, ул. Л. Пилютова, 1); e-mail: info@spvi.ru

Аверкиев Николай Фёдорович, доктор технических наук, профессор; 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

Алексеев Виктор Фёдорович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Алёшкин Андрей Петрович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 341-95-37, e-mail: vka@mil.ru

Басыров Александр Геннадьевич, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Башкирцев Виктор Павлович, кандидат педагогических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Бирюков Денис Николаевич, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Гаврилов Анатолий Дмитриевич, доктор военных наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-42.

Грудинин Игорь Владимирович, доктор военных наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Доронин Александр Павлович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-52, e-mail: vka@mil.ru

Ефимов Владимир Васильевич, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-21, e-mail: vka@mil.ru

Калинин Владимир Николаевич, заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации; доктор технических наук, профессор; действительный член Российской академии космонавтики имени К. Э. Циолковского и Санкт-Петербургской инженерной академии; член-корреспондент Международной инженерной академии, Российской инженерной академии, Международной академии информатизации; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-08.

Козлов Владимир Владимирович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Крыжановский Владимир Иванович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Кужекин Николай Сергеевич, кандидат философских наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

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.

Мионов Андрей Николаевич, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-74.

Назаров Андрей Вячеславович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Никулин Юрий Анатольевич, кандидат исторических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Овчаров Владимир Александрович, доктор технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, 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, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (921) 656-51-42, e-mail: vka@mil.ru

Павлов Александр Николаевич, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-62.

Пилькевич Сергей Владимирович, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Радионов Николай Васильевич, доктор экономических наук, профессор; 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

Репях Николай Андреевич, кандидат философских наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Садин Дмитрий Викторович, 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

Федулов Сергей Валентинович, кандидат исторических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Фоминов Иван Вячеславович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-21.

Шмелёв Валентин Валерьевич, доктор технических наук; 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

Щербина Игорь Сергеевич, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Щукин Георгий Георгиевич, доктор физико-математических наук, профессор; заслуженный деятель науки Российской Федерации; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); Муромский институт (филиала) ФГБОУВО «Владимирский государственный университет имени А. Г. и Н. Г. Столетовых» (602264, Владимирская обл., Муром, ул. Орловская, 23); e-mail: vka@mil.ru