

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

Выпуск 688

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. Кунгурова**, 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. 18.09.2023.
Формат печатного листа 450×320/2.
Уч.-печ. л. 64,00. Уч.-изд. л. 31,75
Тираж 26 экз. Заказ 4118/76.
Отпечатано в типографии
Военно-космической академии
имени А. Ф. Можайского

СОДЕРЖАНИЕ

СВЯЗЬ, УПРАВЛЕНИЕ, НАВИГАЦИЯ И ВОЕННАЯ РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

- Авксентьев А. А., Колпин М. А.* Метод моделирования движения космического аппарата с прогнозированием бортовых и моделируемых истинных параметров 6
- Булекбаева М. Ю., Гончаров П. С., Зозуля Л. П.* Метод определения параметров некооперируемого сближения между круговыми некомпланарными орбитами 14
- Вознюк В. В., Копалов Ю. Н., Фомин А. В.* Исследование помехоустойчивости приема сигналов с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM) в условиях воздействия внутренних шумов и внешних помех с угловой модуляцией 22

СБОР И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

- Абашева И. В.* Классификация эмоционального содержания текста со смешанным кодом 32
- Шемелов В. А., Ефременко А. Н., Рослов Л. Д.* К вопросу о возможности использования данных реанализа для изучения статистической структуры полей параметров тропосферы 41

ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

- Бирюков Д. Н., Лебедев С. Л., Руссу В. Ю.* Подход к автоматизации поиска уязвимостей в прошивках телекоммуникационных устройств 54
- Ломако А. Г., Менисов А. Б., Тимашов П. В.* Выявление утечки наборов данных машинного обучения с использованием цифровых водяных знаков 60

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

- Антропова А. В., Козлов В. В., Стельмах С. Ф.* Методика формирования показателей технического состояния электромеханического привода обеспечивающих систем малых космических аппаратов 71
- Басотин Е. В., Локтионов В. М., Щербина И. С.* Модель конфликтных ситуаций, возникающих в процессе функционирования организационно-технических систем 80
- Вивчарь Р. М., Есипов Е. Н., Кокарев А. С., Решетников Д. В.* Имитационное моделирование функционирования системы эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры как инструмент обоснования параметров технического обслуживания 87
- Воронин А. Е., Пешехонов Н. Е., Порядин Д. И.* Оптимизация структуры системы электроснабжения на основе применения модифицированного симплекс-метода 99

<i>Герасименко С. Ю., Низовцев В. М., Петухов А. И.</i> Методика численного расчета процессов обтекания профилированных элементов конструкции теплообменных устройств и систем охлаждения двигателей летательных аппаратов потоком вязкой несжимаемой жидкости.....	105
<i>Гориков Л.К., Лебедев Е.Л., Румянцев К.В.</i> Модель напряженно-деформированного состояния в пластически деформируемых элементах демпфирующих устройств	112
<i>Дорожко И.В., Копейка А.Л., Копейка Е.А.</i> Методический подход к оцениванию достоверности многоэтапного контроля технического состояния объектов на основе динамических байесовских сетей доверия	120
<i>Ильин А.В., Карагодин В.В., Рыбаков Д.В.</i> Математические модели распределительной электрической сети для исследования режимов ее функционирования	130
<i>Карагодин В.В., Ревяков Б.А., Рыбаков Д.В.</i> Обоснование необходимости перевода распределительных электрических сетей специальных объектов на напряжение 20 кВ	140
<i>Крупский К.А., Прокопенко Е.А., Хлебников С.Г., Чернявский В.А.</i> Методика технико-экономического обоснования предельных сроков использования возвращаемых ступеней ракет космического назначения тандемной схемы	146
<i>Локтионов В.М., Щербина И.С.</i> Оценивание состояния организационно-технической системы военного назначения по экспериментальным данным на основе логико-вероятностного моделирования	156
<i>Немиров А.В., Радионов Н.В., Скопцов А.А., Янгузов А.В.</i> Прогнозирование потенциального энергопритока для космического аппарата, снабженного солнечной батареей с одной степенью свободы	165
<i>Петухов А.И., Султанов А.Э.</i> Использование мультимодельного подхода для моделирования продольных автоколебаний в ракетах-носителях	175
<i>Полозов Г.П., Попов А.М., Шмелев В.В.</i> Методика диагностирования технической системы в условиях априорной неопределенности	183
ПРОБЛЕМЫ ВОЕННОГО ОБРАЗОВАНИЯ, ВОИНСКОГО ОБУЧЕНИЯ И ВОСПИТАНИЯ, УПРАВЛЕНИЯ ПОВСЕДНЕВНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ ВОЙСК	
<i>Важенин Ю.А., Новиков Д.А., Чернов Д.В.</i> Модель организации физической подготовки обучающихся образовательных организаций высшего образования воздушно-космических сил в ходе практик	199
ВОЕННО-СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ И КОНСТРУКЦИИ	
<i>Гледенов В.А., Гула Д.Н., Миргородский А.Н.</i> Анализ потребления теплоты в системах кондиционирования воздуха специальных сооружений при реализации энергосбережения	205
<i>Загрутдинов Ю.А., Мачнев С.А., Тюрин Е.А.</i> Совершенствование способа проектирования общевоинского здания	211

ОПЕРАТИВНОЕ ИСКУССТВО И ТАКТИКА

<i>Казахов Б.Д., Каминский О.Э., Салтыков К.Б.</i> Предложения по обоснованию сущности и номенклатуры показателей, характеризующих возможности по выполнению целевых задач организационно-техническими системами запуска космических аппаратов	218
<i>Козлов Ю.В., Кукушкин М.А., Пономарев Д.Ю.</i> Методический подход к оцениванию количественно-качественного соотношения сил противоборствующих сторон в тактическом звене управления	227
<i>Новиков В.А., Салтыков К.Б., Толстов Д.В.</i> Подход к повышению эффективности функционирования системы управления организационно-техническими системами военного назначения	235
Рефераты статей	243
Сведения об авторах	250
Сведения о рецензентах	255

А. А. Авксентьев,
кандидат технических наук, доцент;
М. А. Колпин,
кандидат технических наук

МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С ПРОГНОЗИРОВАНИЕМ БОРТОВЫХ И МОДЕЛИРУЕМЫХ ИСТИННЫХ ПАРАМЕТРОВ

Предложен метод моделирования движения космического аппарата с прогнозированием бортовых и моделируемых истинных параметров. Показано, что разница между результатами, получаемыми при расчетах традиционным и предложенным методами, является существенной и вызывает необходимость обоснованного выбора метода моделирования. Сделан вывод о целесообразности применения предложенного метода для аппаратов, в системах управления которыми применяются прогнозирование и коррекция бортовых параметров. Путем расчетов показано, что управление с прогнозированием и коррекцией бортовых параметров является более точным, чем управление без прогнозирования. Предложенный метод моделирования может быть полезен при разработке систем управления движением космических аппаратов повышенной точности.

Ключевые слова: космический аппарат, истинный параметр, измерительное устройство, измеряемый параметр, результат измерения, бортовой параметр.

ВВЕДЕНИЕ

Движение космического аппарата (КА) характеризуется рядом параметров: ускорением, скоростью, координатами, направляющими косинусами, скоростью вращения и др. Традиционно каждый из параметров описывается одной переменной величиной, которая используется как для характеристики положения КА, так и для расчетов управляющих воздействий [1–4]. Однако такой подход не всегда соответствует сущности моделируемого процесса и в итоге может уменьшиться точность получаемых результатов.

Для повышения точности в ряде случаев следует применять моделируемые истинные (ИП) и бортовые (БП) параметры движения КА, а также измеряемые (измеренные) параметры (результаты измерений – РИ).

Истинными являются параметры, точно описывающие движение аппарата, на которые реагируют измерительные устройства. Истинные параметры были бы доступными для использования в алгоритмах прогноза и управления при абсолютной точности измерений. Однако измерениям присущи ошибки, с учетом которых измерительные устройства преобразуют истинные параметры в измеренные. Получаемые РИ служат для коррекции или замены имеющихся на борту КА соответствующих прогнозируемых бортовых параметров. Соответствующих как по физической сущности, так и по моментам времени, на которые параметры прогнозируются. В результате коррекции или замены получают бортовые параметры, доступные для прогнозирования и использования в алгоритмах управления.

Истинные параметры отличаются от бортовых не только численными значениями, но и своими свойствами. Истинные параметры существуют независимо от желания исследователя и не могут изменяться скачкообразно.

В отличие от ИП бортовые параметры могут скачкообразно корректироваться и использоваться в алгоритмах управления.

Коррекции производятся различными способами, например путем замены прогнозируемых БП на получаемые РИ. Однако замена не всегда целесообразна, так как результаты измерений содержат ошибки. Поэтому БП могут быть приближены к ИП, например путем усреднения соответствующих БП и РИ, что равносильно усреднению содержащихся в них

ошибок. Но в некоторых случаях в качестве БП все же выбирают только прогнозируемые БП или только РИ. Например, при длительном отсутствии результатов измерений или в начале моделирования, когда еще нет прогнозируемых БП.

Соответствующие друг другу ИП и БП имеют не только отличия, но и общие черты. В промежутках между коррекциями истинные и бортовые параметры изменяются по одинаковым законам. Например, скорость изменяется как интеграл от соответствующего ускорения.

У традиционного и предлагаемого методов моделирования есть общие черты. В обоих методах путем отклонения ИП на величины ошибок моделируются результаты измерений. В обоих методах проводится циклический расчет. Циклом расчета является повторяющаяся последовательность действий, приводящая к вычислению всех необходимых параметров движения на минимальное время вперед. Это время является шагом интегрирования.

Применение традиционного метода начинается с задания истинных параметров для первого цикла расчета. Затем ИП отклоняются на величины ошибок измерений и получаются РИ, которые для первого цикла являются бортовыми параметрами. С их применением рассчитываются управляющие воздействия. На основе имеющихся ИП, рассчитанных управляющих воздействий и уравнений движения прогнозируются ИП для второго цикла расчета.

На втором и последующих циклах расчета указанная последовательность действий, в основном, повторяется. Исключения составляют те циклы, на которых не моделируются измерения. На таких циклах управляющие воздействия рассчитываются с учетом неизменных РИ. С использованием РИ, полученных управляющих воздействий и уравнений движения моделируемые ИП прогнозируются на шаг вперед.

Предлагаемый метод как и традиционный тоже начинается с задания ИП для первого цикла расчета. С учетом ИП и ошибок измерений моделируются РИ. Полученные РИ применяются как БП при первом цикле расчета управляющих воздействий. С применением имеющихся ИП, рассчитанных управляющих воздействий и уравнений движения моделируются прогнозируемые ИП. Они применяются, если на следующем цикле расчета предусматривается моделирование измерений.

С применением БП, управляющих воздействий и уравнений движения моделируются прогнозируемые БП. На этот же момент времени моделируются РИ, что позволяет провести фильтрацию, выбрав в качестве БП значения, находящиеся между прогнозируемыми значениями БП и соответствующими РИ. Такое моделирование в ряде случаев точнее, чем традиционное, описывает процессы, происходящие в реальном полете, но это не означает необходимость полного отказа от традиционного метода.

Применение традиционного метода является менее трудоемким, и в случае управления движением КА без прогнозирования параметров движения приводит к более точному приближению к истинным параметрам движения. Однако управление без прогнозирования параметров движения высокой точностью выполнения требуемых конечных условий не отличается. Благодаря развитию вычислительной техники такое управление заменяется на более точное, содержащее прогнозирование параметров движения КА. Оно позволяет повысить точность, автономность и результативность применения космических аппаратов. В этом случае применение традиционного метода в меньшей степени соответствует моделируемому процессу и снижает его точность.

Снижение точности моделирования может привести к ошибочным выводам о достижении космическим аппаратом цели полета. Поэтому метод, применение которого позволяет уменьшить ошибки моделирования, является актуальным.

ОПИСАНИЕ ПРЕДЛАГАЕМОГО МЕТОДА

Предлагаемый метод предназначен для моделирования в случаях управления с прогнозированием бортовых параметров движения КА. Основные действия, выполняемые при ис-

пользовании такого метода, объединены в блоки и показаны на схеме, изображенной на рис. 1.

В блоке 1 разрабатываются математические модели для расчетов ИП, РИ и БП космического аппарата. Модели представляют собой системы дифференциальных и алгебраических уравнений движения центра масс КА, вокруг центра масс КА, моделирования результатов измерений и коррекций БП с применением РИ и прогнозируемых БП. При составлении моделей учитываются законы физики и математические закономерности, основные действующие силы и моменты, характеристики КА и бортовой аппаратуры, а также алгоритмы управления движением космического аппарата.



Рис. 1. Схема применения метода

В блоке 2 задаются начальные значения истинных параметров движения, масса и моменты инерции КА, ошибки измерительных приборов, силовые и точностные характеристики исполнительных органов, а также значения параметров, при достижении любого из которых моделирование заканчивается.

В блоке 3 рассчитываются показания готовых к измерению и выбранных для использования измерительных устройств. Готовность к измерению определяется временем, необходимым для подготовки к следующему измерению, и временем, прошедшим после предыдущего измерения, а выбор – необходимостью использования измерительного устройства для решения задачи полета.

Действия, производимые в блоке 3 на первом цикле моделирования, отличаются от действий, выполняемых на последующих циклах. На первом цикле моделирования получают результаты измерений, значения которых присваиваются соответствующим бортовым параметрам. На последующих циклах значения БП рассчитываются путем коррекции соответствующих прогнозируемых БП с применением полученных РИ.

В блоке 4 вычисляются управляющие воздействия, прикладываемые к КА. При этом используются рассчитанные БП и алгоритмы для вычисления управляющих воздействий.

В блоке 5 с учетом рассчитанных управляющих воздействий и в соответствии с разработанными математическими моделями прогнозируются ИП и БП на шаг вперед. Таким шагом является шаг интегрирования.

В блоке 6 проверяются выполнения условий окончания моделирования. Их может быть несколько: по времени, по расходу топлива или характеристической скорости, а также по попаданию в требуемую окрестность заданных параметров. Если ни одно из условий не выполняется, то моделирование продолжается в соответствии с действиями, описанными в блоке 3. Если же одно или несколько условий выполняются, то применение метода завершается.

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРИМЕНЕНИЯ ТРАДИЦИОННОГО И ПРЕДЛАГАЕМОГО МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Сравнение результатов применения рассматриваемых методов в общем случае возможно на качественном уровне и проводилось в предыдущем изложении. Далее для традиционного и предлагаемого методов решается задача сравнения численных результатов моделирования.

Постановка задачи.

Пусть в начальный момент времени $t_0 = 0$ КА находится на геостационарной орбите (ГСО) с работающей двигательной установкой (ДУ), создающей управляющее ускорение $\mathbf{W}_{ДУ} = 2 \text{ см/с}^2$ в трансверсальном направлении.

Движение центра масс КА в абсолютной геоцентрической экваториальной системе координат описывается уравнениями [5, 6]:

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{V}_{КА}}{dt} = \mathbf{g}(\mathbf{R}_{КА}) + \mathbf{W}_{ДУ}, \\ \frac{d\mathbf{R}_{КА}}{dt} = \mathbf{V}_{КА}, \end{cases} \quad (1)$$

где $\mathbf{V}_{КА}$ – вектор скорости КА;
 $\mathbf{R}_{КА}$ – радиус-вектор КА;
 $\mathbf{g}(\mathbf{R}_{КА})$ – вектор гравитационного ускорения;
 $\mathbf{W}_{КА}$ – вектор ускорения КА от ДУ;
 t – время.

Двигательная установка закреплена на корпусе КА, изменение направления $\mathbf{W}_{КА}$ производится путем разворотов космического аппарата. Вращение КА описывается динамическими уравнениями Эйлера [7]:

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

где J_x, J_y, J_z – моменты инерции КА относительно осей ox, oy, oz связанной с аппаратом системы координат;

- $\frac{d\omega_x}{dt}, \frac{d\omega_y}{dt}, \frac{d\omega_z}{dt}$ – проекции вектора ускорения вращения КА на связанные с ним оси;
 $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – проекции вектора скорости вращения аппарата на связанные оси;
 M_x, M_y, M_z – проекции вектора управляющего момента сил на оси ox, oy, oz .

Для управления движением вокруг центра масс применяется алгоритм, изложенный в работе [8].

Системы уравнений (1) и (2) описывают изменения истинных и бортовых параметров движения. Для ИП используется нижний индекс «И», а для БП – «Б». Отсутствие индекса означает принадлежность к обоим типам параметров. Для результатов измерений используется индекс «Р».

Координаты \mathbf{R}_P и вектор скорости \mathbf{V}_P центра масс КА измеряются с помощью навигационной аппаратуры потребителя (НАП). Результаты измерений координат при моделировании работы НАП определяются сложением:

$$\mathbf{R}_P = \mathbf{R}_И + \Delta\mathbf{R}, \quad (3)$$

где $\mathbf{R}_И$ – истинные координаты центра масс;

$\Delta\mathbf{R}$ – вектор, имеющий случайное направление, равномерно распределенное в пространстве, и модуль с нулевым математическим ожиданием и среднеквадратической ошибкой (СКО) 10 м.

Результаты измерений вектора скорости при моделировании работы НАП определяются аналогично координатам:

$$\mathbf{V}_P = \mathbf{V}_И + \Delta\mathbf{V}, \quad (4)$$

где $\mathbf{V}_И$ – истинный вектор скорости КА;

$\Delta\mathbf{V}$ – вектор, имеющий случайное направление, равномерно распределенное в пространстве, а также модуль с нулевым математическим ожиданием и СКО 2 см/с.

Навигационные спутники, обеспечивающие работу НАП, находятся на высотах вдвое меньших высоты ГСО. Антенны навигационных спутников направлены вниз и обеспечивают работу НАП только когда не менее четырех спутников находятся по отношению к КА с противоположной стороны ГСО вблизи диска Земли и не заслоняются Землей. Эта особенность приводит к значительным перерывам в получении РИ с помощью НАП. В данной задаче принимается, что НАП работает нормально в течение первых 300 с, измеряя координаты и составляющие скорости КА через каждые 0,1 с. Затем НАП в течение 700 с не работает, после чего указанные интервалы работы и отсутствия измерений повторяются в той же последовательности.

Кроме этого, на борту КА без погрешностей производятся следующие измерения:

- с периодичностью 25 с определяются направления осей ox, oy, oz космического аппарата;
- на каждом цикле расчета измеряются составляющие скорости вращения и кажущегося ускорения КА.

Предполагается, что все измерительные, преобразующие и исполнительные устройства КА, кроме НАП, работают точно и безынерционно.

Требуется рассчитать:

- расстояние между истинными координатами центров масс КА при традиционном и предлагаемом методах моделирования;
- расстояние между истинными и бортовыми координатами центров масс КА при использовании традиционного метода моделирования;
- расстояние между истинными и бортовыми координатами центров масс КА при использовании предлагаемого метода моделирования.

На основании полученных результатов необходимо сделать вывод о целесообразности применения предлагаемого метода моделирования.

Решение поставленной задачи.

Для решения поставленной задачи разработан программный комплекс, моделирующий движение КА традиционным и предлагаемым методами.

Комплекс содержит блок моделирования измерений и коррекций бортовых параметров движения, в котором при необходимости вырабатываются случайные ошибки. Каждая ошибка используется дважды: в традиционном и в предлагаемом методах, вычисления по которым проводятся параллельно и применяются как в отношении координат, так и в отношении вектора скорости КА.

С помощью разработанного комплекса вычислены расстояния $\Delta R_{\text{ИИ}}(t_i)$ между истинными положениями центров масс КА при использовании традиционного и предлагаемого методов моделирования. Результаты в виде множества значений $\Delta R_{\text{ИИ}}(t_i)$, $t_i \in [0, 3600 \text{ с}]$ с шагом 0,05 с приведены на рис. 2. На этом и на последующих рисунках по оси ординат указывается расстояние в метрах, а по оси абсцисс – время в секундах.

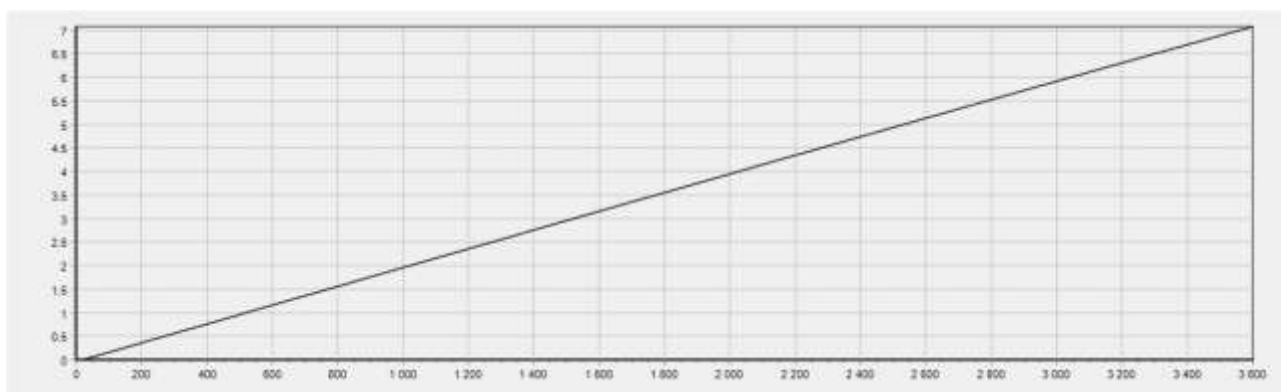


Рис. 2. Значения $\Delta R_{\text{ИИ}}(t_i)$, $t_i \in [0, 1000 \text{ с}]$

Приведенные на рис. 2 значения $\Delta R_{\text{ИИ}}(t_i)$ служат для определения необходимости выбора между традиционным и предлагаемым методами моделирования. Если разница между положениями центров масс при использовании традиционного и предлагаемого методов моделирования не является существенной, то предлагаемый метод хуже традиционного, поскольку он не может существенно повысить точность моделирования и более труден в реализации. Но расчет показывает, что отличие в истинных координатах за 3600 с полета достигает 7,0 м и возрастает по близкой к линейной зависимости от времени. Для большинства задач, решаемых КА, такая разница в результатах моделирования является существенной. Следовательно требуется выработать рекомендации по выбору одного из двух рассматриваемых методов.

Лучшим из методов моделирования является тот, который соответствует управлению, применяемому в реальном полете. Если в полете применяется управление, не использующее прогнозирование бортовых параметров движения, то целесообразно применить традиционный метод моделирования. Так следует поступить, например, в случае управления движением КА по жесткой временной программе. Если же в реальном полете применяется управление, использующее прогнозирование бортовых параметров движения, то следует применить предлагаемый метод.

На рис. 3 в диапазоне $t_i \in [0, 3600 \text{ с}]$ представлены расстояния между положениями центров масс КА с шагом 0,05 с. Такие положения рассчитываются по ИП и БП при использовании управления без прогнозирования БП.

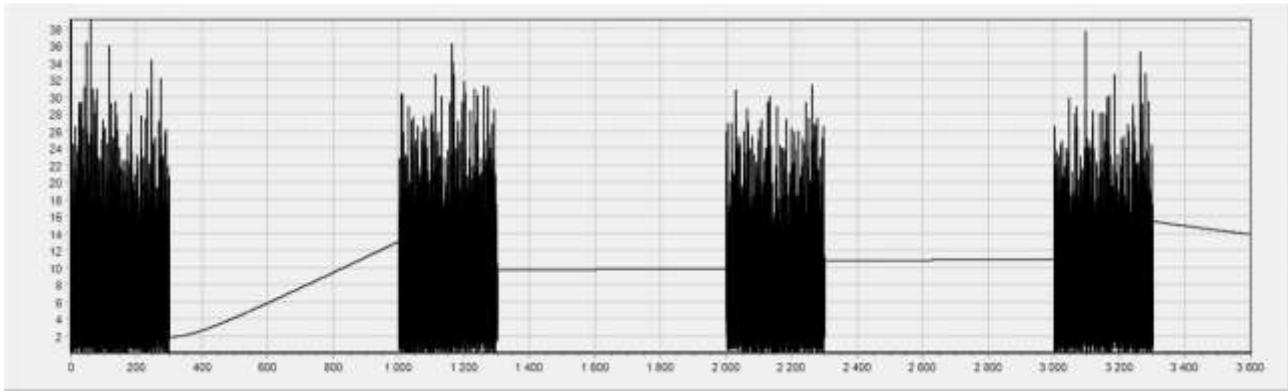


Рис. 3. Расстояния между положениями центров масс КА, рассчитанными по ИП и БП при использовании управления без прогнозирования БП

На рис. 4 в диапазоне $t_i \in [0, 3600 \text{ с}]$ представлены расстояния между положениями центров масс КА с шагом 0,05 с. Такие положения рассчитываются по ИП и БП при использовании управления с прогнозированием и коррекциями БП.

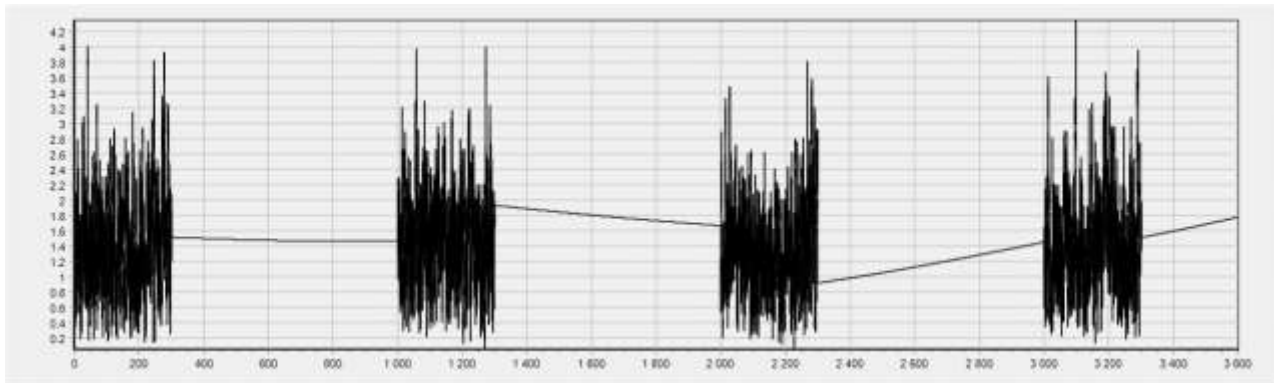


Рис. 4. Расстояния между положениями центров масс КА, рассчитанными по ИП и БП при использовании управления с прогнозированием и коррекциями БП

Каждое из значений, представленных на рис. 3 и 4, соединяется прямой линией с двумя ближайшими по времени значениями – слева и справа. Получается кусочно-линейная зависимость.

Расчеты показали, что расстояния, представленные на рис. 4, существенно уменьшились по сравнению с расстояниями, приведенными на рис. 3. Уменьшение расстояний означает повышение точности не только управления, но и моделирования, поскольку уменьшается случайная составляющая значений БП.

В качестве показателя точности было выбрано ΔR_{cp} , представляющее собой среднее арифметическое расстояний, показанных на рис. 3 или на рис. 4. Менее объективно характеризует точность максимальное значение из представленных расстояний ΔR_{max} , но оно тоже имеет значение.

Для моделирования без прогнозирования БП, результаты которого приведены на рис. 3, рассчитаны значения: $\Delta R_{\text{cp}} = 9,2 \text{ м}$, $\Delta R_{\text{max}} = 39 \text{ м}$.

Для моделирования с прогнозированием и коррекцией, результаты которого приведены на рис. 4, рассчитаны значения: $\Delta R_{\text{cp}} = 1,5 \text{ м}$, $\Delta R_{\text{max}} = 4,3 \text{ м}$.

Полученные результаты показывают, что управление с прогнозированием и коррекцией БП обладает более высокой точностью, чем управление без прогнозирования БП. Для повы-

шения точности управления целесообразно применять системы управления движением КА с прогнозированием и коррекцией БП, а при моделировании работы систем использовать рассмотренный в данной статье метод.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен метод моделирования параметров движения КА, включающий в себя прогнозирование измеренных, бортовых и моделируемых истинных параметров, а также коррекцию бортовых параметров движения по результатам измерений.

Показано, что разница между результатами, полученными при расчетах предложенным и традиционно используемым методами является существенной. В рассмотренном случае она составляет 7 м за 1 ч полета и растет по близкой к линейной зависимости от времени. Это обуславливает необходимость обоснованного выбора между предложенным и традиционным методами моделирования движения КА.

В работе сделан вывод о целесообразности применения предложенного метода для моделирования движения КА, в системах управления которыми применяется прогнозирование и коррекция бортовых параметров. В приведенном примере показано, что такое управление приводит к уменьшению средней погрешности представления бортовых параметров с 9,2 м до 1,5 м. Управление с прогнозированием и коррекцией бортовых параметров является более точным, чем традиционно используемое управление без прогнозирования и приводит к выводу о востребованности предлагаемого метода моделирования движения КА.

Применение предложенного метода может быть полезным при разработке систем управления движением космических аппаратов повышенной точности.

Список используемых источников

1. Бахшиян Б. Ц., Назиров Р. Р., Эльясберг П. Е. Определение и коррекция движения. – М. : Наука, 1980. – 360 с.
2. Алексеев К. Б., Бебенин Г. Г. Управление космическим летательным аппаратом. – М. : Машиностроение, 1974. – 340 с.
3. Жамков А. С., Жаров В. Е. Моделирование движения двух информационно связанных космических аппаратов в гравитационном поле Земли для решения гравиметрических задач // Вестник Московского университета. Сер. 3 : Физика. Астрономия. – 2018. – № 5. – С. 70–76.
4. Гродзовский Г. Л., Иванов Ю. Н., Токарев В. В. Механика космического полета с малой тягой. – М. : Наука, 1966. – 630 с.
5. Власов С. А., Мамон П. А. Теория полета космических аппаратов : учеб. пособие. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2007. – 435 с.
6. Авксентьев А. А. Управление движением центра масс космического аппарата при мягком сближении с орбитальным объектом на участке ближнего наведения // Известия вузов. Приборостроение. – 2016. – Т. 59, № 5. – С. 364–369.
7. Бутенин Н. В., Луиц Я. Р., Меркин Д. Р. Курс теоретической механики : в 2 т. – М. : Наука, 1979. – Т. 2. – 544 с.
8. Авксентьев А. А. Оптимальное управление угловым движением космического аппарата при оперативном сближении с орбитальным объектом // Известия вузов. Приборостроение. – 2016. – Т. 59, № 2. – С. 128–133.

М. Ю. Булекбаева;
П. С. Гончаров,
кандидат технических наук, доцент;
Л. П. Зозуля,
кандидат технических наук

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ НЕКООПЕРИРУЕМОГО СБЛИЖЕНИЯ МЕЖДУ КРУГОВЫМИ НЕКОМПЛАНАРНЫМИ ОРБИТАМИ

Представлен метод численно-аналитического определения времени отделения объекта от космического аппарата КА₁, находящегося на исходной орбите, для реализации некооперируемого сближения с космическим аппаратом КА₂, находящимся на целевой орбите. Орбиты КА₁ и КА₂ некомпланарны. Параметры переходной орбиты и время перелета находятся как функции от истинной аномалии и времени, при котором космические аппараты находятся на минимальном расстоянии друг от друга.

Реализуется некооперируемое сближение с одним импульсом, прикладываемым в точке старта исходной орбиты.

Ключевые слова: одноимпульсное некооперируемое сближение, некомпланарные орбиты, интервал времени, космический аппарат.

ВВЕДЕНИЕ

С началом космической эры возникла необходимость в разработке теоретических основ расчета межорбитальных некооперируемых сближений (МНС). Межорбитальным некооперируемым сближением считается движение по траектории от точки, в которой в данный момент времени находится первый космический аппарат, до точки, в которой будет находиться второй космический аппарат, при отсутствии ограничений на скорость в финальной точке.

В настоящее время параллельно со стремительным развитием ракетной техники и практической космонавтики активизировались работы по изучению МНС. По решению задач МНС опубликовано большое количество статей и монографий. Большинство опубликованных работ посвящено компланарным многоимпульсным МНС [1–4]. Существенно меньше работ опубликовано по некомпланарным МНС [5, 6]. Можно отметить, что имеются лишь единичные работы, посвященные одноимпульсным МНС [7]. Одноимпульсное МНС является более прогрессивным [5], но менее изученным и развитым, ввиду сложности его реализации из-за ограничения величины импульса.

В настоящей работе предлагается оригинальное решение задачи расчета параметров одноимпульсного МНС с существенным расширением допустимого диапазона значений исходного импульса.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Определены две круговые орбиты КА₁ и КА₂, параметры которых представлены в табл. 1.

В момент времени t_0 положение космических аппаратов КА₁ и КА₂ задано радиусами-векторами $\vec{r}_{01} = \vec{r}_1(t_0)$ и $\vec{r}_{02} = \vec{r}_2(t_0)$. Требуется:

- определить время отделения $\Delta t_{\text{ст}}$ объекта от КА₁, для реализации некооперируемого сближения;
- построить траекторию соударения (жесткой встречи) космического объекта с КА₂, находящимся на конечной орбите.

Таблица 1

Исходные параметры

Параметры орбит	КА ₁	КА ₂
Радиус	r_1	r_2
Наклонение	i_1	i_2
ПВВУ	Ω_1	Ω_2
Начальный аргумент широты	u_{01}	u_{02}

Задача решается в три этапа:

1. Нахождение времени перелета Δt_1 отделяемого от КА₁ объекта по орбите перехода, проходящей через концы векторов $\vec{r}_{1\min} = \vec{r}_1(t_{\min})$ и $\vec{r}_{2\min} = \vec{r}_2(t_{\min})$, соответствующих минимальному угловому расстоянию ψ_{\min} между КА₁ и КА₂. Минимальное расстояние достигается в момент времени $t_{\min} = t(\psi_{\min})$ от начала движения.

2. Нахождение времени перелета Δt_2 по орбите перехода, проходящей через концы векторов $\vec{r}_{11} = \vec{r}_1(t_{\min} - \Delta t_1)$ и $\vec{r}_{2\min}$.

3. Нахождение времени старта с КА₁ для реализации некооперируемого сближения.

При численно-аналитической реализации некооперируемого сближения в рассматриваемой задаче исходные орбиты являются круговыми. Других ограничений на параметры орбит не выявлено.

МЕТОД И ОСОБЕННОСТИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Этап 1. Для определения минимального углового расстояния ψ_{\min} между $\vec{r}_{1\min}$ и $\vec{r}_{2\min}$ можно воспользоваться аппаратом кватернионов. Геометрическая интерпретация кватерниона позволяет определить закон изменения длины дуги большого круга, задаваемый вращательным движением радиусов-векторов \vec{r}_1 и \vec{r}_2 , т. е. позволяет определить угловое расстояние на основе действительной части кватерниона [8]:

$$\psi = \arccos \left(-\frac{\vec{r}_2}{|\vec{r}_2|} \cdot \left(\frac{\vec{r}_1}{|\vec{r}_1|} \right)^{-1} \right), \quad (1)$$

где $\psi = \psi(t)$ – угловое расстояние между КА₁ и КА₂;
 $\vec{r}_2 = \vec{r}_2(t)$ – закон движения радиуса-вектора КА₂;
 $\vec{r}_1 = \vec{r}_1(t)$ – закон движения радиуса-вектора КА₁.

С учетом (1) график изменения углового расстояния между КА₁ и КА₂ в зависимости от времени представлен на рис. 1. Для нахождения $t_{\min} = t(\psi_{\min})$ определяется первый локальный минимум путем построения ряда разностей исследуемой функции, анализ изменения знака ряда разностей позволяет найти требуемый интервал. В найденном интервале методом градиентного спуска вычисляется искомый локальный минимум.

Определив таким образом время $t_{\min} = t(\psi_{\min})$ достижения минимального углового расстояния ψ_{\min} , отсчитываемое от t_0 , и вычислив в этот момент времени $\vec{r}_{1\min}$ и $\vec{r}_{2\min}$, через их концы строится орбита перехода.

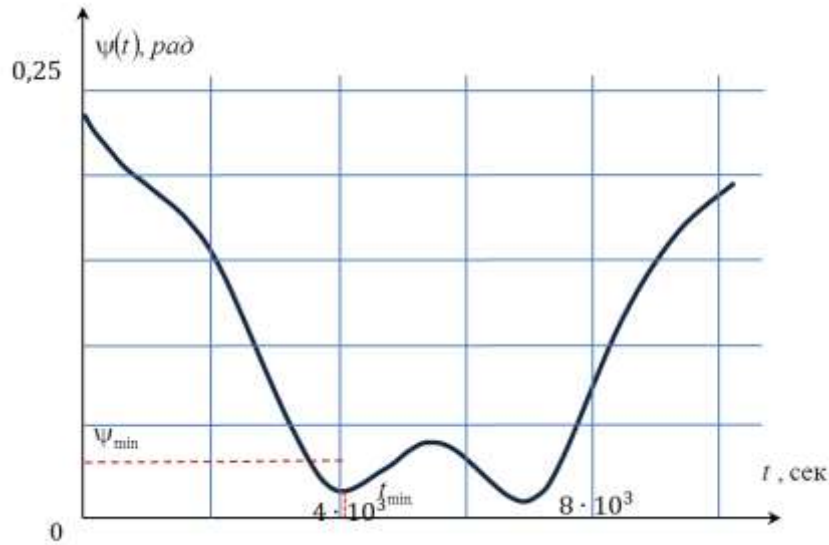


Рис. 1. График изменения углового расстояния между КА₁ и КА₂ в зависимости от времени

Уравнение эллипса, проходящего через данные точки, задается следующей зависимостью:

$$r_{1\text{перех}} = \frac{p_1}{1 + e_1 \cdot \cos \vartheta_1}, \quad (2)$$

где $r_{1\text{перех}}$ – переходная эллиптическая орбита, $r_{1\text{перех}} = r_{1\text{перех}}(\vartheta_1, t_{\min})$;

p_1 – фокальный параметр, $p_1 = p_1(\vartheta_1, t_{\min})$;

e_1 – эксцентриситет, $e_1 = e_1(\vartheta_1, t_{\min})$;

ϑ_1 – истинная аномалия, которая выбрана в качестве основной характеристики перехвата, $\vartheta_1 = \vartheta_1(t_{\min})$.

Значения фокального параметра p_1 и эксцентриситета e_1 определяются из выражений [9]:

$$p_1 = \frac{\vec{r}_1 \cdot \vec{r}_2 \cdot (-\cos(\vartheta_1 + \psi_{\min}) + \cos \vartheta_1)}{-\vec{r}_2 \cdot \cos(\vartheta_1 + \psi_{\min}) + \vec{r}_1 \cdot \cos \vartheta_1}; \quad (3)$$

$$e_1 = \frac{(\vec{r}_2 - \vec{r}_1)}{-\vec{r}_2 \cdot \cos(\vartheta_1 + \psi_{\min}) + \vec{r}_1 \cdot \cos \vartheta_1}. \quad (4)$$

Для существования эллипса (2) требуется найти интервал истинной аномалии $[\vartheta_{1\min}, \vartheta_{1\max}]$, удовлетворяющий условию $0 \leq e(\vartheta_1, t) \leq 1$ (рис. 2), который находится из неравенства:

$$(r_2 - r_1) \leq -r_2 \cdot \cos(\vartheta_1 + \psi_{\min}) + r_1 \cdot \cos \vartheta_1.$$

В работе предлагается следующий подход для определения интервала $[\vartheta_{1\min}, \vartheta_{1\max}]$:

– вводится функция $f = f(\vartheta_1, t_{\min})$, определяемая как разность знаменателя и числителя формулы (4):

$$f = -r_2 \cdot \cos(\vartheta_1 + \psi_{\min}) + r_1 \cdot \cos \vartheta_1 - (r_2 - r_1);$$

– находится максимум функции $f_1 = f_1(\vartheta_1, \psi_{\min})$:

$$f_1 = -r_2 \cdot \cos(\vartheta_1 + \psi_{\min}) + r_1 \cdot \cos \vartheta_1$$

на интервале ϑ_1 :

$$P = \max(f_1(\vartheta_1, t_{\min}), \vartheta_1);$$

– численным методом находятся корни функции f , которые определяют границы искомого интервала.

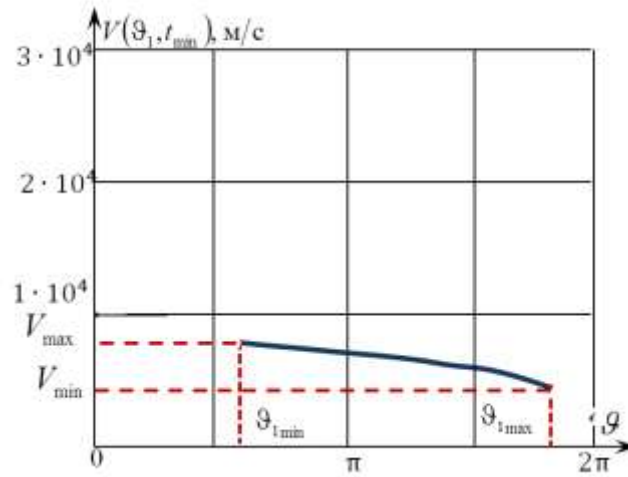


Рис. 2. График изменения скорости

После того, как определена эллиптическая траектория перехода, находятся составляющие скорости отделяемого объекта в точке, определяемой $\vec{r}_{1\min}$ [10]:

– трансверсальная составляющая скорости $V_{1\tau} = V_{1\tau}(\vartheta_1, t_{\min})$:

$$V_{1\tau} = \sqrt{\frac{\mu}{p_1}} \cdot (1 + e_1 \cdot \cos \vartheta_1);$$

– радиальная составляющая скорости $V_{1r} = V_{1r}(\vartheta_1, t_{\min})$:

$$V_{1r} = \sqrt{\frac{\mu}{p_1}} \cdot e_1 \cdot \sin \vartheta_1.$$

Параметры переходной орбиты полностью заданы координатами точек, определяемыми радиусами-векторами $\vec{r}_{1\min}$ и $\vec{r}_{2\min}$. Используя постоянную площадей, находят элементы переходной орбиты:

- наклонение переходной орбиты;
- прямое восхождение восходящего узла;
- аргумент широты КА₁.

По полученным $V_{1\tau}$ и V_{1r} определяются функция импульса $\Delta \vec{V}_1 = \Delta \vec{V}_1(\vartheta_1, t_{\min})$ и скорость перехода $\vec{V}_1 = \vec{V}_1(\vartheta_1, t_{\min})$.

В зависимости от истинной аномалии можно варьировать значение $\vec{V}_1(\vartheta_1, t_{\min})$. Время перелета Δt_1 на участке от КА₁ до КА₂ (рис. 2) определяется через среднюю аномалию по зависимости [11]:

$$\Delta t_1 = \frac{M_{\text{КА}_2} - M_{\text{КА}_1}}{n_1}, \quad (5)$$

где $M_{\text{КА}_1}$ – средняя аномалия в точке, определяемой $\vec{r}_1(t_{\min})$, $M_{\text{КА}_2} = M_{\text{КА}_2}(\vartheta_1, t_{\min})$;

- $M_{КА_2}$ – средняя аномалия в точке, определяемой $\vec{r}_2(t_{\min})$, $M_{КА_2} = M_{КА_2}(\vartheta_1, t_{\min})$;
 n_1 – среднее движение, $n_1 = n_1(\vartheta, t_{\min})$;
 Δt_1 – время перелета на участке от КА₁ до КА₂, $\Delta t_1 = \Delta t_1(\vartheta_1, t_{\min})$.

Средние аномалии $M_{КА_1}$ и $M_{КА_2}$ определяются по зависимостям из работы [11]. После определения Δt_1 следует перейти к выполнению второго этапа.

Этап 2. Первым приближением для выбора времени отделяемого от КА₁ объекта предлагается назначить следующий момент времени от начала движения:

$$t_1 = t_{\min} - \Delta t_1.$$

Для вычисления параметров точки отделения объекта от КА₁, находящегося на исходной орбите, и определения времени перелета Δt_2 по новой орбите требуется выполнить следующие вычисления:

- 1) найти положение КА₁, определяемое радиусом-вектором $\vec{r}_{11} = \vec{r}_{11}(t_{\min} - \Delta t_1)$ в момент времени t_1 ;
- 2) определить орбиту перехода между КА₁ и КА₂, положение которых определяется \vec{r}_{11} и $\vec{r}_{2\min}$;
- 3) найти соотношение, связывающее параметры переходной орбиты,

$$r_{2\text{перех}}(\vartheta_2, t_{\min}, t_1) = \frac{p_2(\vartheta_2, t_{\min}, t_1)}{1 + e_2(\vartheta_2, t_{\min}, t_1) \cdot \cos \vartheta_2},$$

- где ϑ_2 – истинная аномалия исследуемой переходной орбиты;
 $p_2(\vartheta_2, t_{\min}, t_1)$ – фокальный параметр исследуемой переходной орбиты;
 $e_2(\vartheta_2, t_{\min}, t_1)$ – эксцентриситет исследуемой переходной орбиты;

- 4) найти импульс $\Delta \vec{V}_2 = \Delta \vec{V}_2(\vartheta_2, t_{\min}, t_1)$ как функцию ϑ_2 и скорость перехода $\vec{V}_2 = \vec{V}_2(\vartheta_2, t_{\min}, t_1)$;

- 5) определить угол α между векторами \vec{V}_2 и \vec{r}_{11} ;

- 6) найти время движения $\Delta t_2 = \Delta t_2(\vartheta_2, t_{\min}, t_1)$ по новой переходной орбите между двумя космическими аппаратами, определяемыми радиусами-векторами \vec{r}_{11} и $\vec{r}_{2\min}$;

Для контроля движения по новой переходной орбите необходимо воспользоваться уравнением траектории перехода, записанным в векторной форме [12]:

$$\vec{r}_{2\text{перех}} = r_{2\text{перех}} \cdot \left(\cos(\varphi) \cdot \frac{\vec{r}_{11}}{r_{11}} + \sin(\varphi) \cdot \frac{\vec{r}_{11} \times (\vec{V}_2 \times \vec{r}_{11})}{r_{11} \cdot (V_2 \cdot r_{11})} \right),$$

где

$$r_{2\text{перех}} = \frac{r_{11}^2 \cdot V_2^2 \cdot \sin^2(\alpha)}{r_{11} \cdot V_2^2 \cdot \sin(\alpha) \cdot \sin(\alpha - \varphi) + \mu \cdot (1 - \cos \varphi)}.$$

Здесь $\vec{r}_{2\text{перех}}$ – радиус-вектор, описывающий эллипс переходной орбиты относительно АГЭСК;

φ – угловая дальность от точки старта;

μ – гравитационный параметр Земли;

ϑ_2 – истинная аномалия новой переходной орбиты.

При этом $\vec{r}_{2\text{перех}} = \vec{r}_{2\text{перех}}(\vartheta_2, t_{\min}, t_1, \varphi)$ является функцией четырех переменных.

Этап 3. Для того чтобы движущийся от начального положения космический аппарат КА₂ прилетел в точку, определяемую радиусом-вектором $\vec{r}_{2\min}$, и отделяемый от КА₁ объект прилетел в точку встречи с КА₂, определяемую радиусом-вектором $\vec{r}_{2\text{перех}}$, одновременно, необходимо, чтобы

$$\Delta t_1 = \Delta t_2,$$

Для выполнения этого условия предлагается следующий алгоритм.

1. Находится интервал времени $t(e_2 = 1) \leq t_{\text{инт}} \leq t(e_2 = 0)$. Граничное значение интервала $t(e_2 = 1)$ находится как корень уравнения

$$1 = e_2(\vartheta_2, t_{\min}, t_1 - t_{\text{инт}}).$$

Любое значение из этого интервала удовлетворяет условию $0 \leq e_2(\vartheta_2, t_{\min}, t_1 - t_{\text{инт}}) \leq 1$.

2. Из определенного в п. 1 интервала методом градиентного спуска находится корень уравнения

$$\Delta t_2(\vartheta_2, t_{\min}, t_1 - t_{\text{доб}}) - \Delta t_1(\vartheta_1, t_{\min}) = 0.$$

Корнем данного уравнения является время $t_{\text{доб}}$, на которое необходимо отодвинуть время отделения объекта от КА₁ относительно t_1 .

Если старт отодвигается на более ранний срок от t_1 , т. е. $t_{\text{ст}} = t_1 - t_{\text{доб}}$, то при этом уменьшается импульс, который необходимо сообщить для реализации некооперируемого сближения, следовательно, увеличивается время некооперируемого сближения. Если время отделения объекта от КА₁ будет $t_{\text{ст}} = t_1 + t_{\text{доб}}$, то увеличивается импульс и уменьшается время некооперируемого сближения.

В качестве примера использования разработанного метода приведены результаты моделирования движения отделяемого от КА₁ объекта при следующих исходных данных, указанных в табл. 2.

Таблица 2

Исходные данные

Наименование	Значение
Радиус r , м	$7,871 \cdot 10^6$
Радиус R , м	$7,921 \cdot 10^6$
Долгота восходящего узла Ω , град	70
Наклонение i_1 , град	62
Наклонение i_2 , град	37
Угол u_1 , град	-10
Угол u_2 , град	10

В примере предлагается $\Delta \vec{V}_1$ взять минимальным, а Δt_1 – максимальным. Время отделения объекта от КА₁ предлагается отодвигать от точки, определяемой \vec{r}_{11} , на $t_{\text{доб}}$ в сторону более раннего старта. Результаты представлены на рис. 3 и рис. 4 в виде фрагментов визуализации. На рис. 3 представлен момент начала движения после старта.

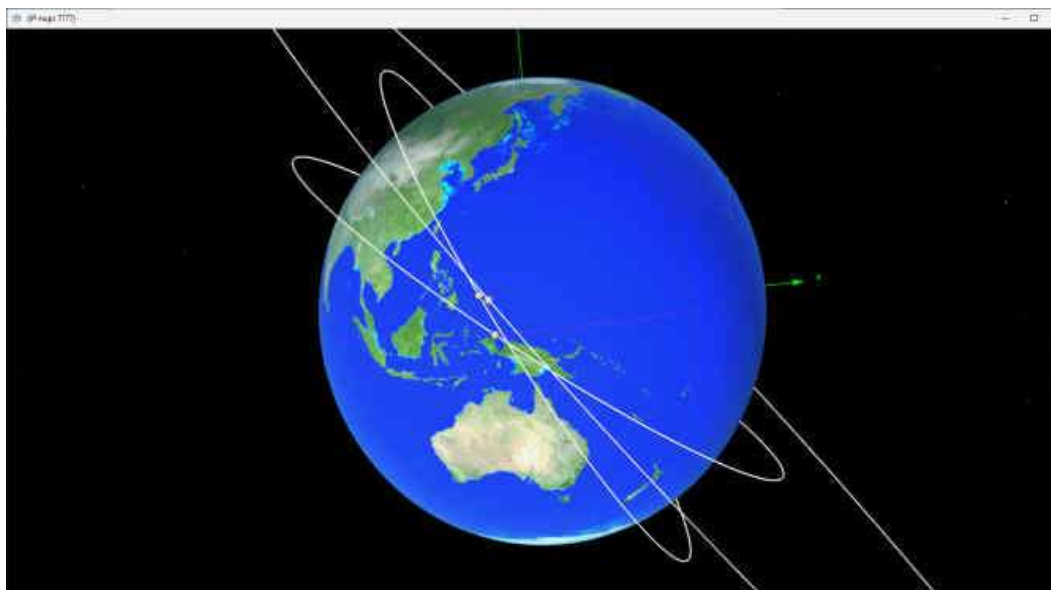


Рис. 3. Отделение объекта

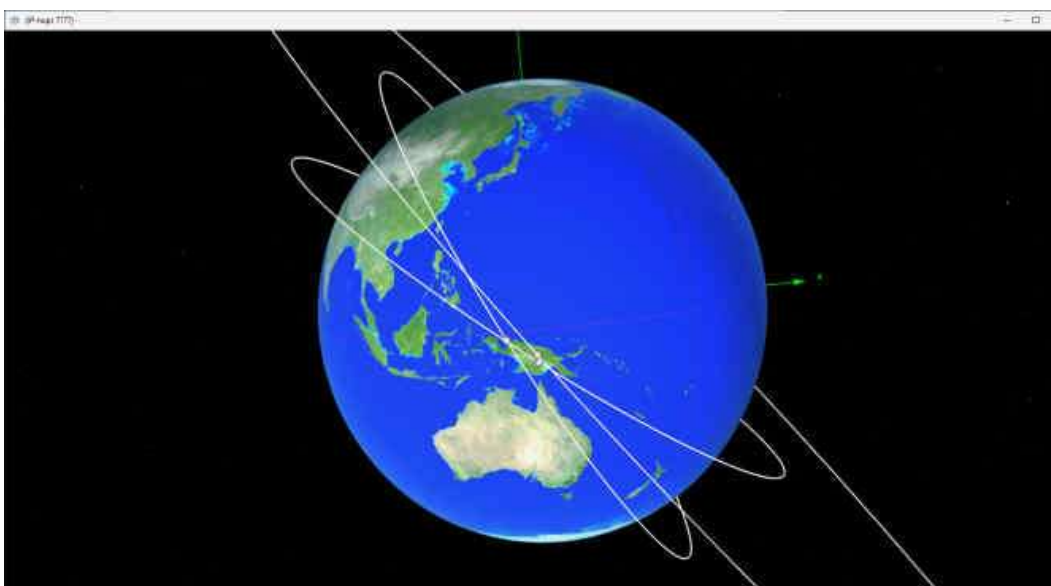


Рис. 4. Некооперируемое сближение

На рис. 4 показан момент непосредственно перед некооперируемым сближением. Реализация всего расчетного алгоритма проведена в среде Mathcad. Визуализация выполнена на языке программирования C++.

ВЫВОД

Предложенный в статье расчетный метод позволяет:

- 1) определить время старта отделяемого от КА₁ объекта;
- 2) определить время перелета отделяемого от КА₁ объекта до достижения им КА₂;
- 3) в зависимости от поставленной задачи:
 - минимизировать затраты на маневр, но при этом увеличится время перелета;
 - сократить время перелета, но при этом увеличатся затраты на маневр.

Список используемых источников

1. *Королев В. С., Олехова Е. Ф.* О построении оптимальной траектории встречи на компланарной круговой орбите при наличии сильных ограничений на время движения // Математические методы решения инженерных задач. – М. : МО РФ, 2005. – С. 98–104.
2. *Кирпичников С. И., Воробьев А. Ю., Тетерин С. Н.* Качественные свойства орбит энергетически оптимальных импульсных перелетов между круговыми компланарными орбитами при заданном времени старта // Космические исследования. – 2003. – Т. 41, № 5. – С. 471–480.
3. *Кирпичников С. И., Зубов Е. Ю.* Многовитковые оптимальные импульсные перелеты между круговыми компланарными орбитами // Вестник СПбГУ. Сер. 1. – 2006. – Вып. 3. – С. 84–91.
4. *Гончаревский В. С.* Управление маневром космических аппаратов с ограничением на вид траекторий // Информация и космос. – 2023. – Вып. 1. – С. 158–164.
5. *Эскобал П.* Методы астродинамики. – М. : Мир, 1971. – 344 с.
6. *Roth H. L.* Transfer from an Arbitrary Inertial Flight Condition to a Point Target. – J. Aerospace Sci., 1961. – 180 p.
7. *Роговская О. Н., Кирпичников С. И.* Многовитковые импульсные перехваты между круговыми компланарными орбитами // Вестник СПбГУ. Сер. 10. – 2007. – Вып. 3. – С. 55–65.
8. *Зозуля Л. П., Булекбаева М. Ю., Житный М. В.* Оценивание опасного сближения космических объектов на круговых орбитах с применением аппарата кватернионов // Сборник трудов XXIV ВНТК «Актуальные проблемы защиты и безопасности». – СПб. : ЗАО «НПО СМ», 2021. – Т. 1. – С. 46–50.
9. *Зозуля Л. П., Гончаров П. С., Житный М. В.* Методический подход к определению минимальной скорости перехода космического аппарата в заданную точку целевой орбиты // Известия Тульского государственного университета. – 2023. – Вып. 1. – С. 411–415.
10. *Дубошин Г. Н.* Небесная механика. Основные задачи и методы. – М. : Наука, 1968. – 800 с.
11. *Иванов Н. М., Лысенко Л. Н.* Баллистика и навигация космических аппаратов. – М. : Дрофа, 2004. – 544 с.
12. *Зозуля Л. П., Булекбаева М. Ю., Гончаров П. С.* Применение вектора Лапласа для оценивания параметров сближения частицы космического мусора с космическим аппаратом // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2021. – Вып. 676. – С. 179–185.

В. В. Вознюк,
кандидат технических наук, доцент;
Ю. Н. Копалов;
А. В. Фомин,
кандидат технических наук

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ПРИЕМА СИГНАЛОВ С ОРТОГОНАЛЬНЫМ ЧАСТОТНЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ КАНАЛОВ (OFDM) В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВНУТРЕННИХ ШУМОВ И ВНЕШНИХ ПОМЕХ С УГЛОВОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

Приведены результаты исследования помехоустойчивости приема сигналов с OFDM на фоне непреднамеренных помех с угловой модуляцией, полученные с использованием имитационной модели канала связи. Получены зависимости средней вероятности ошибки на канальный и информационный бит при приеме сигналов с OFDM от ширины спектра и индекса угловой модуляции помехи на фоне совместно действующих внутренних шумов и внешних помех с угловой модуляцией.

Ключевые слова: OFDM, помехоустойчивость, помеха с угловой модуляцией.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях необходимости обеспечения широкого территориального доступа к сетям коммуникаций, а также высоких требований к скорости передачи информации все более широкое распространение получают спутниковые системы связи и передачи данных, в которых реализовано ортогональное частотное разделение каналов по технологии OFDM (*Orthogonal frequency-division multiplexing*). Например, известно, что подобная технология используется в системах Starlink и OneWeb, расширяя область применения OFDM, определенную стандартами IEEE 802.11 и IEEE 802.16.

Вопросам исследования и повышения помехоустойчивости приема сигналов с OFDM в условиях воздействия помех типа аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ) посвящено множество публикаций, например [1–9]. Однако помехоустойчивость приема сигналов с OFDM в условиях воздействия помех с угловой модуляцией различной интенсивности исследована недостаточно подробно. Известные аналитические выражения для расчета вероятности ошибки на канальный бит при воздействии непреднамеренных помех с угловой модуляцией на приемники сигналов [10–14] не могут быть использованы при оценивании помехоустойчивости приема сигналов с OFDM. Поэтому исследование помехоустойчивости приема сигналов с OFDM на фоне действующих внутренних шумов и внешних непрерывных помех с угловой модуляцией методом имитационного моделирования остается актуальным.

Целью исследования является получение зависимостей средней вероятности ошибки на канальный и информационный бит при приеме сигналов с OFDM от параметров помехи с угловой модуляцией на фоне АБГШ.

МОДЕЛЬ КАНАЛА СВЯЗИ С OFDM

Выбор направления исследований

Под помехоустойчивостью приема сигналов понимается способность радиоприемного устройства различать (восстанавливать) сигналы с заданной достоверностью при наличии помех [15].

Для оценивания помехоустойчивости приема сигналов можно использовать как вероятность ошибки на каналный бит P_{bk} , определяемую на выходе демодулятора, так и вероятность ошибки на информационный бит P_{bi} , определяемую на выходе декодера кода коррекции ошибок.

Известно [16], что вероятность ошибки на каналный бит при приеме OFDM-сигналов на фоне АБГШ определяется только используемым на каждой поднесущей видом модуляции, и для фазовой манипуляции может быть записана в виде

$$P_{bk}^{ш} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{2}{\log_2(M)} \Phi \left(\sin\left(\frac{\pi}{M}\right) \sqrt{\frac{2E_b \log_2(M)}{N_0}} \right), \quad (1)$$

где N – число информационных поднесущих;
 M – позиционность применяемой манипуляции;
 E_b – энергия информационного бита;
 N_0 – спектральная плотность мощности АБГШ.

В работе [14] авторами предложены аналитические выражения для расчета зависимости вероятности ошибки на каналный бит от отношения мощности полезного сигнала и мощностей, воздействующих на приемник фазоманипулированных сигналов помехи с угловой модуляцией и АБГШ. Однако данные выражения применимы только для прицельных по ширине спектра помех с угловой модуляцией. Поэтому для получения зависимостей средней вероятности ошибки на каналный бит при приеме сигналов с OFDM от ширины спектра и индекса угловой модуляции помехи на фоне совместно действующих внутренних шумов и внешних помех с угловой модуляцией используется метод имитационного моделирования. При этом под средней вероятностью ошибки понимается отношение числа искаженных символов к их общему числу, получаемое для каждого опыта, состоящего в имитации процесса передачи и приема фиксированного объема данных (10^6 информационных символов) сигналом при воздействии помех для заданного значения отношения сигнал/помеха при фиксированном отношении сигнал/шум по методу Монте-Карло.

В свою очередь, для перехода от вероятности ошибки на каналный бит к вероятности ошибки на информационный бит используется выражение [16]

$$P_{bi} = \frac{1}{n} \sum_{i=U_i+1}^n C_n^i P_{bk}^i (1 - P_{bk})^{n-i}, \quad (2)$$

где P_{bi} – вероятность ошибки на информационный бит;
 P_{bk} – вероятность ошибки на каналный бит;
 n – длина кодового слова;
 U_i – исправляющая способность кода коррекции ошибок.

Вычисление исправляющей способности кода коррекции ошибок возможно с использованием границы Варшавова – Гильберта, дающей нижнюю оценку кодового расстояния [17]:

$$U_i = \left\lfloor \frac{nh^{-1}(1-R) - 1}{2} \right\rfloor, \quad (3)$$

где R – скорость кодирования;
 h^{-1} – функция, обратная бинарной информационной энтропии, аппроксимируемая как [18]

$$h^{-1}(1-R) = \left(2^{0,6794(1-R)^{0,7244}} - 2^{-0,1357(1-R)^{21,8026}} \right)^{1,992}. \quad (4)$$

В качестве помехи с угловой модуляцией рассмотрим частотно-модулированную шумом (ЧМШ) помеху. Пусть входная реализация $y(t)$ приемника представляет собой аддитивную смесь сигнала $s(t)$, ЧМШ-помехи $p(t)$ и собственных шумов приемника $h(t)$:

$$y(t) = s(t) + p(t) + h(t). \quad (5)$$

При этом ЧМШ-помеха описывается выражением [19]

$$p(t) = A_{\text{п}} \cos \left(2\pi f_{\text{п}} t + \frac{2\pi m_{\text{чм}} F_{\text{ш max}}}{\sigma_{\text{ш}}} \int_0^t \xi_{\text{п}}(\tau) d\tau + \varphi_0 \right), \quad (6)$$

где $\xi_{\text{п}}(\tau)$ – модулирующий шум, сформированный по нормальному закону распределения и имеющий максимальную частоту в спектре $F_{\text{ш max}}$ и среднеквадратическое отклонение $\sigma_{\text{ш}}$;

$A_{\text{п}}$ – амплитуда помехи;

φ_0 – начальная фаза помехи;

$f_{\text{п}}$ – центральная частота в спектре помехи;

$m_{\text{чм}}$ – индекс частотной (угловой) модуляции.

Таким образом, при проведении исследований приняты следующие ограничения и допущения:

- в качестве помехи с угловой модуляцией рассматривается ЧМШ-помеха;
- оценка исправляющей способности кодов коррекции ошибок осуществляется с использованием границы Варшавова – Гильберта. В качестве примера рассмотрено сверточное кодирование со скоростью $R = 2/3$;
- рассматриваются только сигналы с модуляцией BPSK (как сигналы с наиболее помехоустойчивым видом модуляции);
- возможность применения технических решений в тракте радиоприемного устройства по компенсации узкополосных помех не учитывается;
- исследования проводятся применительно к каналу связи, в котором синхронизм по несущей частоте и OFDM-словам уже установлен.

Теперь рассмотрим более подробно имитационную модель канала связи с OFDM.

Описание модели канала связи с OFDM

Используемая модель канала связи с OFDM в общем виде представлена на рис. 1. Программная реализация имитационной модели такого канала связи разработана в среде MATLAB.

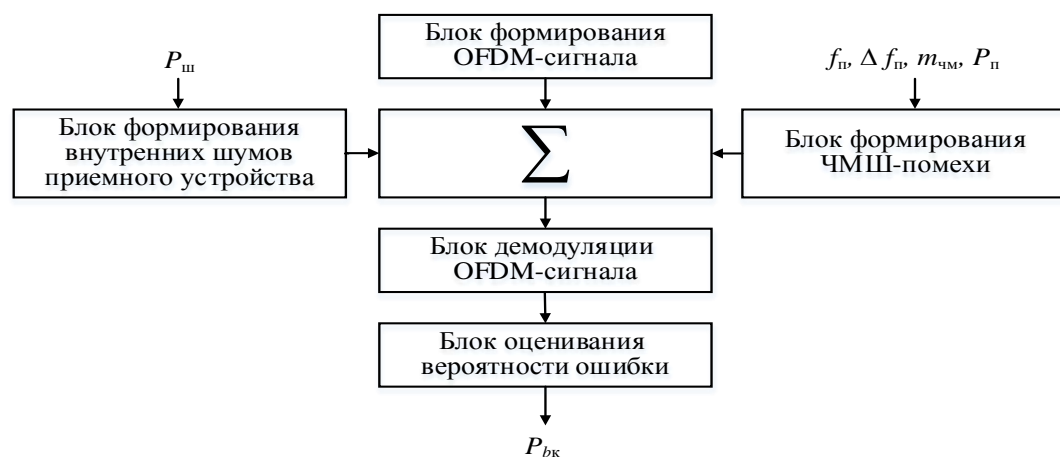


Рис. 1. Общая схема модели канала связи с OFDM

Исходные данные, необходимые для моделирования помех:

- мощность внутренних шумов приемного устройства $P_{ш}$;
- мощность ЧМШ-помехи $P_{п}$;
- центральная частота в спектре помехи $f_{п}$;
- индекс частотной модуляции $m_{чм}$;
- ширина спектра ЧМШ-помехи $\Delta f_{п}$.

Исходные данные по сигналу с OFDM:

- общее число поднесущих N^* ;
- число информационных поднесущих N ;
- длительность слова τ_c ;
- длительность защитного интервала $\tau_{зи}$;

– отношение сигнал/шум при передаче данных в условиях отсутствия ЧМШ-помех. Во всех опытах данное отношение зафиксировано на уровне $Q_0 = 20$ дБВт.

Рассмотрим более подробно каждую составляющую часть модели.

Структура блока формирования OFDM-сигнала представлена на рис. 2.

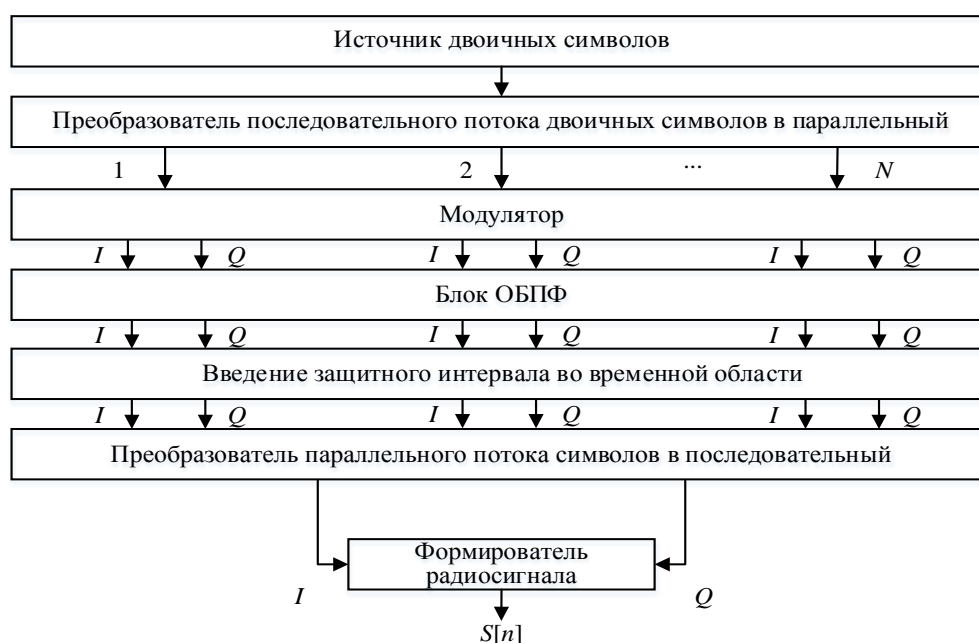


Рис. 2. Структура блока формирования OFDM-сигнала

Последовательный поток данных в последовательно-параллельном преобразователе разбивается на N параллельных информационных потоков, где N равно числу информационных поднесущих в OFDM-сигнале.

Сигналы с выхода блока модулятора в форме дискретных отсчетов на каждом временном такте подаются на вход блока обратного быстрого преобразования Фурье (ОБПФ).

На выходе блока ОБПФ получаем так называемый OFDM-символ, содержащий множество дискретных значений результата преобразования.

Для борьбы с межсимвольной интерференцией, значительно снижающей помехоустойчивость приема, из OFDM-символа формируется OFDM-слово путем добавления к символу части отсчетов этого же символа (защитного интервала, который иногда называют циклическим префиксом).

На практике максимальная длительность защитного интервала $\tau_{зи}$ не превышает одной четвертой от длительности рабочего (используемого для передачи данных) интервала $\tau_{инф}$ [20, 21].

После введения защитного интервала отсчеты OFDM-слов преобразуются из параллельного потока в последовательный.

Дискретный сигнал на интервале одного OFDM-слова τ_c , представляет собой сумму всех отсчетов информационных поднесущих колебаний, модулированных своими модуляционными символами. С учетом того, что в статье рассматривается только модуляция вида BPSK, сигнал можно записать в виде

$$S[n] = \sum_{k=0}^{N-1} I_k \cos\left(\frac{2\pi kn}{N^*}\right), \quad (7)$$

Здесь $I_k = \pm 1$, $n = 1, (N^* + N_{\text{зи}})$, где $N_{\text{зи}}$ – число дискретных отсчетов защитного интервала.

Параметры блока демодуляции OFDM-сигнала соответствуют параметрам блока формирования OFDM-сигнала. В качестве выходных параметров для каждой реализации фиксируются отношение сигнал/помеха и вероятность ошибки на канальный бит $P_{\text{бк}}$.

Блок формирования внутренних шумов приемного устройства позволяет сформировать шумовую помеху со спектром $\Delta F_{\text{ш}} = \Delta f_c$, где Δf_c – ширина спектра OFDM-сигнала, непрерывную во времени (с фиксированной спектральной плотностью средней мощности – N_0).

Математическая модель такого шума может быть представлена следующим выражением [22]:

$$H[n] = \sum_{k=0}^{N-1} \hat{A}_k \cos\left(\frac{2\pi kn}{N^*} + \hat{\beta}_k\right). \quad (8)$$

Здесь \hat{A}_k – случайный коэффициент с релеевским распределением, у которого параметр $\sigma = \sqrt{N_0 \Delta F_{\text{ш}}}$, а $P_{\text{ш}} = N_0 \Delta F_{\text{ш}}$ – мощность внутреннего шума, где $\Delta F_{\text{ш}}$ – ширина полосы частот внутренних шумов, причем $\Delta F_{\text{ш}} = \Delta f_c = \frac{N F_{\text{д}}}{N^*}$ (в этом выражении $F_{\text{д}}$ – частота дискретизации);

$\hat{\beta}_k$ – независимая случайная величина, распределенная равномерно в интервале $[0, 2\pi]$.

Блок формирования ЧМШ-помехи позволяет сформировать помеху с различными значениями мощности $P_{\text{п}}$, индекса частотной модуляции $m_{\text{чм}}$ ширины спектра $\Delta f_{\text{п}}$. Введя обозначение $\mu = \frac{m_{\text{чм}} F_{\text{ш max}}}{\sigma_{\text{ш}}}$, модель помехи можно представить в виде

$$P[n] = A_{\text{п}} \cos\left(\frac{2\pi}{N^*} (k_{\text{п}} n + \mu \sum_{n'=1}^n \xi_{\text{п}}[n']) + \varphi_0\right), \quad (9)$$

где $k_{\text{п}}$ – номер поднесущей в спектре OFDM-сигнала, которому соответствует положение центральной частоты в спектре помехи. При этом ширина спектра такой помехи будет определяться как [23]

$$\Delta f_{\text{п}} = \begin{cases} 2F_{\text{ш max}} & \text{при } m_{\text{чм}} \leq 1, \\ 2m_{\text{чм}} F_{\text{ш max}} & \text{при } m_{\text{чм}} > 1. \end{cases} \quad (10)$$

Примеры внешнего вида спектров, смоделированных OFDM-сигнала и прицельной по центральной частоте в спектре и ширине спектра ЧМШ-помехи с различными значениями индекса частотной модуляции при отношении сигнал/помеха $Q = 5$ дБВт, представлены на рис. 3.

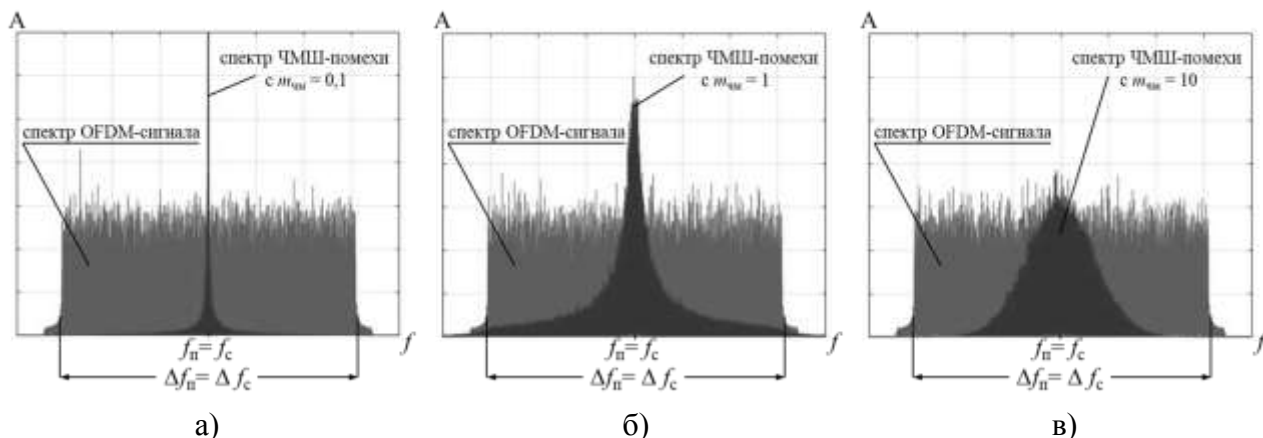


Рис. 3. Примеры спектров OFDM-сигнала и ЧМШ-помехи с $m_{\text{ЧМ}} = 0,1$ (а), $m_{\text{ЧМ}} = 1$ (б) и $m_{\text{ЧМ}} = 10$ (в)

В блоке получения смеси сигнала и мешающих воздействий (обозначенном на рис. 1 знаком Σ) формируются реализации, представляющие собой аддитивную смесь полученного OFDM-сигнала (с фиксированной мощностью P_c), внутреннего шума (с фиксированной плотностью средней мощности N_0) и сформированной помехи.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ПРИЕМА OFDM-СИГНАЛОВ НА ФОНЕ ПОМЕХ С УГЛОВОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

С использованием предложенной модели для OFDM-сигналов с $N = 216$ ($N^* = 256$) исследовано влияние на вероятность ошибки на каналный и информационный бит:

а) прицельной по несущей частоте и ширине спектра непрерывной по времени ЧМШ-помехи (рис. 4) в зависимости от отношения сигнал/помеха при различных значениях индекса частотной модуляции и фиксированном отношении сигнал/шум;

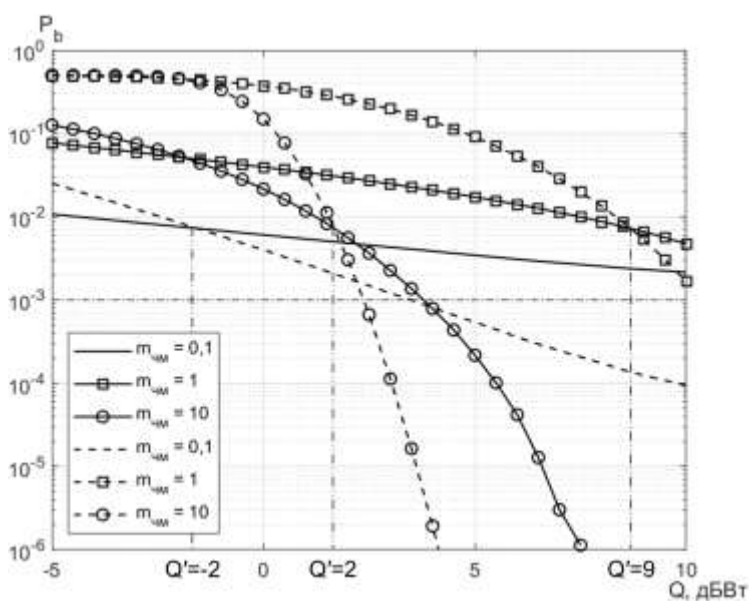


Рис. 4. Зависимости средней вероятности ошибки на каналный (непрерывные линии) и информационный (штриховые линии) бит от отношения сигнал/помеха при фиксированном отношении сигнал/шум в условиях прицельной по несущей частоте и ширине спектра ЧМШ-помехи

б) прицельной по несущей частоте и ширине спектра непрерывной ЧМШ-помехи в зависимости от индекса частотной модуляции при различных отношениях сигнал/помеха и фиксированном отношении сигнал/шум (рис. 5);

в) прицельной по несущей частоте непрерывной ЧМШ-помехи в зависимости от ширины спектра помехи при фиксированных значениях индекса частотной модуляции и отношениях сигнал / помеха и сигнал / шум (рисунок 6).

На рисунках используется обозначение Q – отношение сигнал/помеха.

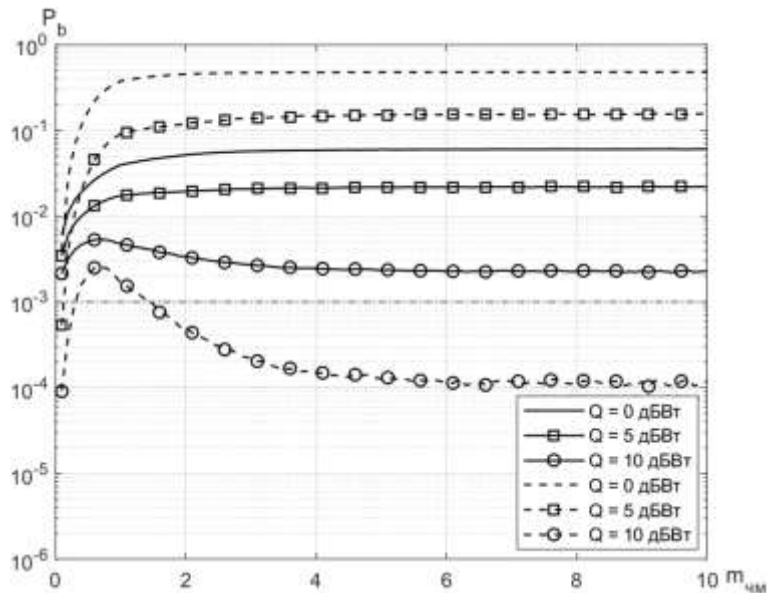


Рис. 5. Зависимости средней вероятности ошибки на каналный (непрерывные линии) и информационный (штриховые линии) бит от значения индекса частотной модуляции для прицельной по ширине спектра ЧМШ-помехи при различных отношениях сигнал/помеха и фиксированном отношении сигнал/шум

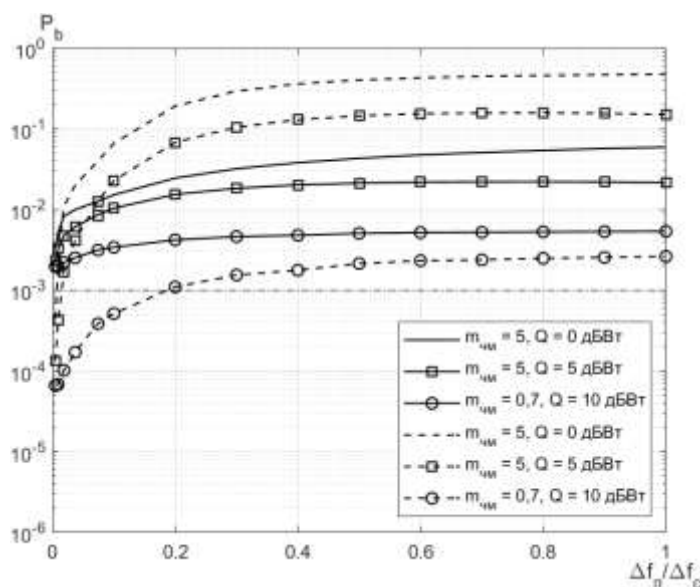


Рис. 6. Зависимости средней вероятности ошибки на каналный (непрерывные линии) и информационный (штриховые линии) бит от отношения ширины спектра помехи к ширине спектра сигнала для различных значений индекса частотной модуляции и отношений сигнал/помеха

Представленные на рис. 4 и 5 зависимости показывают, что для прицельных по ширине спектра сигнала ЧМШ-помех значение индекса частотной модуляции, определяющее форму спектра помехи, оказывает значительное влияние на вероятность ошибки на бит.

Для высоких отношений сигнал/помеха зависимость вероятности ошибки на бит от индекса частотной модуляции носит экстремальный характер с максимумом в диапазоне $0,5 < m_{\text{чм}} < 1$. Факт наличия такого максимума и соответствующее ему значение индекса частотной модуляции определяются нелинейной зависимостью между отношением доли энергии помехи в полосе частот сигнала к энергии сигнала и отношением максимального значения интенсивности помехи в полосе частот отдельной поднесущей к среднему значению интенсивности помехи в полосе частот отдельной поднесущей. При этом применение помехоустойчивого кодирования имеет различную эффективность: минимальное число исправленных ошибок приходится на значение индекса частотной модуляции в точке максимума вероятности ошибки на бит, с увеличением значения $m_{\text{чм}}$ число исправляемых ошибок нелинейно возрастает.

По мере уменьшения отношения сигнал/помеха зависимости вероятности ошибки на бит от индекса частотной модуляции становятся монотонно возрастающими. При этом эффективность помехоустойчивого кодирования целесообразно охарактеризовать через достижение уровня ошибки на каналный бит, при котором обеспечивается выигрыш от применения помехоустойчивого кодирования. Для малых отношений сигнал/помеха данная точка Q' соответствует значениям $m_{\text{чм}} < 0,5$. Однако для помехи с индексом частотной модуляции, близким к 1, достижение указанного уровня происходит при достаточно высоком отношении сигнал/помеха, которое значительно уменьшается по мере отклонения $m_{\text{чм}}$ от 1 (для приведенных на рис. 4 зависимостей при $m_{\text{чм}} = 1$ $Q' = 9$ дБВт, а при $m_{\text{чм}} = 0,1$ $Q' = -2$ дБВт и при $m_{\text{чм}} = 10$ $Q' = 2$ дБВт).

Например, для приведенных на рис. 5 зависимостей характерный максимум вероятности битовой ошибки достигается при $m_{\text{чм}} = 0,7$ и $Q = 10$ дБВт. Рассмотрим для указанных значений зависимость средней вероятности ошибки на каналный и информационный бит от отношения ширины спектра помехи к ширине спектра сигнала.

Представленные на рис. 6 зависимости показывают, что в случаях, когда ширина спектра помехи не превышает ширину спектра сигнала, влияние ширины спектра помехи на вероятность ошибки на бит незначительно. Зависимости средней вероятности ошибки на бит от отношения ширины спектра помехи к ширине спектра сигнала носят монотонный характер. При высоких отношениях сигнал/помеха для узкополосных помех ($\Delta f_{\text{п}}/\Delta f_{\text{с}} < 0,2$) эффективность применения помехоустойчивого кодирования выше, чем для прицельных по ширине спектра сигнала помех, а при низких отношениях сигнал/помеха значение вероятности ошибки на каналный бит, при которой обеспечивается выигрыш от применения помехоустойчивого кодирования, достигается уже при $\Delta f_{\text{п}}/\Delta f_{\text{с}} < 0,1$. Кроме того, вероятность ошибки на каналный бит не превышает $P_b' = 1/2N$ для помехи с шириной спектра $\Delta f_{\text{п}} \leq \Delta f_{\text{с}}/N$ независимо от значения индекса частотной модуляции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье с использованием имитационной модели канала связи с OFDM решены задачи по получению частных результатов оценивания помехоустойчивости приема OFDM-сигналов на фоне внутренних шумов и помехи с угловой модуляцией.

По итогам моделирования получены следующие результаты:

– при приеме OFDM-сигналов на фоне ЧМШ-помехи с шириной спектра $\Delta f_{\text{п}} \leq \Delta f_{\text{с}}/N$ достигается предельное значение вероятности ошибки на каналный бит, определяемое как $P_b' = 1/2N$ и не зависящее от значения индекса частотной модуляции;

– для высоких отношений сигнал/помеха зависимость вероятности ошибки на бит от индекса частотной модуляции носит экстремальный характер с максимумом в диапазоне $0,5 < m_{\text{чм}} < 1$. При этом применение помехоустойчивого кодирования имеет различную эффективность: минимальное число исправленных ошибок приходится на значение индекса частотной модуляции в точке максимума вероятности ошибки на бит, с увеличением значения $m_{\text{чм}}$ число исправляемых ошибок нелинейно возрастает;

– для малых отношений сигнал/помеха значение вероятности ошибки на канальный бит, при котором обеспечивается выигрыш от применения помехоустойчивого кодирования, достигается при значениях $m_{\text{чм}} < 0,5$. Однако для помехи с индексом частотной модуляции, близким к 1, достижение указанного уровня происходит при достаточно высоком отношении сигнал/помеха, которое значительно уменьшается по мере отклонения значения $m_{\text{чм}}$ от 1;

– в случаях, когда ширина спектра помехи не превышает ширину спектра сигнала, влияние ширины спектра помехи на вероятность ошибки на бит незначительно. Зависимости средней вероятности ошибки на бит от отношения ширины спектра помехи к ширине спектра сигнала носят монотонный характер. При высоких отношениях сигнал/помеха для узкополосных помех ($\Delta f_{\text{п}}/\Delta f_{\text{с}} < 0,2$) эффективность применения помехоустойчивого кодирования выше, чем для прицельных по ширине спектра сигнала помех, а при низких отношениях сигнал/помеха значение вероятности ошибки на канальный бит, при котором обеспечивается выигрыш от применения помехоустойчивого кодирования, достигается уже при $\Delta f_{\text{п}}/\Delta f_{\text{с}} < 0,1$.

ВЫВОД

Таким образом, цель исследования, заключающаяся в получении зависимостей средней вероятности ошибки на канальный и информационный бит при приеме сигналов с OFDM от ширины спектра и индекса угловой модуляции помехи на фоне совместно действующих внутренних шумов и внешних помех с угловой модуляцией, достигнута. Получены сечения для различных значений отношений сигнал/помеха, представляющие собой зависимости средней вероятности ошибки на бит от соответствующих параметров помехи с угловой модуляцией и показывающие характерные особенности влияния данной помехи на качество приема сигналов с OFDM.

Список используемых источников

1. Anurag Pandey, Sandeep Sharma BER Performance of OFDM System in AWGN and Rayleigh Fading Channel // International Journal of Engineering Trends and Technology. – 2014. – Vol. 13, № 3. – P. 126–128.
2. Siddhaling V. Moholkar. BER Performance for FFT and Wavelet Based OFDM Systems over AWGN Channel // International Journal of Research and Scientific Innovation. – 2015. – Vol. 2, № 8. – P. 52–54.
3. Ложкин К. Ю. Помехоустойчивость приема OFDM-сигнала с однократной фазовой манипуляцией и корректирующим кодированием на фоне полигармонической помехи // Информатика и космос. – 2018. – № 2. – С. 37–43.
4. Хоанг В. З., Парамонов А. А. Помехоустойчивость передачи сигналов OFDM в системах радиосвязи с ППРЧ в условиях деструктивного воздействия преднамеренных помех // Системы компьютерной математики и их приложения. – 2021. – № 22. – С. 84–89.
5. Волчков В. П., Ермолаев Д. А., Кирсанов В. А. Исследование помехоустойчивости OFDM системы при нарушении синхронизации в разных моделях многолучевого канала // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2018. – Т. 18, № 4. – С. 1018–1024.

6. *Воронин Д. А.* Анализ помехоустойчивости систем связи с OFDM с оценкой параметров канала // *Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем.* – 2017. – № 5. – С. 167–169.
7. *Карасева Т. С.* Проблемы помехоустойчивости в OFDM системах // *Перспективы развития информационных технологий.* – 2015. – № 24. – С. 85–89.
8. Методика оценивания параметров сигналов с OFDM-модуляцией / С. С. Старицин [и др.] // *Журнал радиоэлектроники.* – 2020. – № 6. – С. 1–16.
9. Влияние ошибки оценивания несущей частоты на качество приема сигналов с OFDM-модуляцией / К. В. Семенов [и др.] // *Журнал радиоэлектроники.* – 2021. – № 10. – С. 1–11.
10. *Довбня В. Г., Коптев Д. С., Бабанин И. Г.* Оценка потенциальной помехоустойчивости приёма цифровых сигналов, используемых в современных и перспективных системах радиорелейной и спутниковой связи // *Известия Юго-Западного государственного университета. Сер.: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение.* – 2020. – Т. 10, № 1. – С. 21–35.
11. Approximate Closed-form Expression for the Average BER of M-ary PSK with Gaussian-distributed Phase Error / Ahn S. [et al.] // *27th International Conference on Telecommunications (ICT).* – 2020. – P. 1–4. – DOI: 10.1109/ICT49546.2020.9239556.
12. *Ложкин К. Ю., Прохеторко С. С.* Синтез и оценка эффективности помех приемно-решающему устройству M-KAM-сигнала на интервале приема последовательности из m посылок // *Радиотехника.* – 2021. – Т. 85, № 3. – С. 37–48. – DOI: 10.18127/j00338486-202103-04.
13. Аналитические зависимости средней вероятности искажения бита W-KAM-сигнала на фоне гармонической или фазоманипулированной помех с учетом замираний / К. Ю. Ложкин [и др.] // *Радиотехника.* – 2020. – Т. 84, № 4(8). – С. 27–35. – DOI 10.18127/j00338486-202004(8)-03.
14. *Паришуткин А. В., Бучинский Д. И., Комлык Д. А.* Исследование помехоустойчивости приемников сигналов с дискретной фазовой модуляцией в условиях помех с угловой модуляцией и шумов // *Труды МАИ.* – 2023. – № 129. – DOI: 10.34759/trd-2023-129-16.
15. *Скляр Б.* Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение : пер. с англ. – М. : Вильямс, 2003. – 1104 с.
16. *Лузин В. И., Никитин Н. П., Гадзиковский В. И.* Основы формирования, передачи и приема цифровой информации : учеб. пособие. – М. : СОЛОН-Пресс, 2014. – 316 с.
17. *Van H. Vu, Lei Wu* Improving the Gilbert-Varshamov Bound for Q-ary Codes // *IEEE Transactions on Information Theory.* – 2005. – P. 3200–3208.
18. Exact and Approximated Outage Probability Analyses for Decode-and-Forward Relaying System Allowing Intra-Link Errors / X. Zhou [et al.] // *IEEE Transactions on Wireless Communications.* – 2014. – Vol. 13, № 12. – P. 7062–7071. – DOI: 10.1109/TWC.2014.2354337.
19. *Вознюк В. В., Зайцев С. А., Фомин А. В.* Оценивание качества преднамеренных помех цифровым системам передачи информации методом компьютерного моделирования // *Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского.* – 2014. – Вып. 645. – С. 79–87.
20. *Носов В. И.* Методы повышения помехоустойчивости систем радиосвязи с использованием технологии MIMO и пространственно-временной обработки сигнала : моногр. – Новосибирск : Сибирск. гос. ун-т телекоммуникаций и информатики, 2014. – 316 с.
21. *Паришуткин А. В., Бучинский Д. И.* Модель функционирования канала спутниковой связи в условиях искажений служебной части кадров нестационарными помехами // *Информатика и автоматизация.* – 2020. – Т. 19, № 5. – С. 967–990.
22. *Вознюк В. В., Бучинский Д. И., Фомин А. В.* Исследование помехоустойчивости приемника сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией к воздействию помех с различной структурой // *Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского.* – 2019. – Вып. 671. – С. 120–127.
23. *Сиротин И. Н., Паришуткин А. В., Левин Д. В.* Аппаратурный анализ сигналов : учеб. пособие. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2021. – 224 с.

И. В. Абашева,
кандидат технических наук

КЛАССИФИКАЦИЯ ЭМОЦИОНАЛЬНОГО СОДЕРЖАНИЯ ТЕКСТА СО СМЕШАННЫМ КОДОМ

В статье рассматривается проблема классового дисбаланса, которая является одним из важных вопросов оценивания эмоционального содержания сообщений со смешанным кодом. Предлагается подход к анализу эмоционального содержания для текстовых сообщений со смешанным кодом с использованием метода выборки в сочетании с метриками расстояния Левенштейна. Приводится сравнение характеристик различных подходов к машинному обучению.

Ключевые слова: текстовые сообщения со смешанным кодом, эмоциональное содержание, машинное обучение, обучающая выборка.

ВВЕДЕНИЕ

Систематизация особенностей поступающей телеметрической информации выявила ее неоднородность, что не позволяет классическими методами провести синтез алгоритмов оперативной обработки и выполнить требования по качеству обработки информации в условиях жестких временных ограничений [1]. Благодаря быстрому развитию социальных сетей пользователи могут легко обмениваться, обсуждать или передавать свою информацию, которая охватывает множество интересов, включая политику, обзоры различных продуктов, научные новинки и многое другое. В связи с локдауном COVID-19 количество онлайн-пользователей в социальных сетях значительно увеличилось. Кроме того, сайты социальных сетей предоставляют пользователям возможность создавать контент на родном языке или на смешанном языковом коде [2]. Под смешанным кодом в статье подразумеваются тексты, включающие в себя разные языки и символные конструкции для выражения своих взглядов при общении в социальных сетях.

Наличие данных со смешанным кодом значительно усложняет процедуры машинного перевода, поиска информации, идентификации языка, анализа настроений и другие задачи обработки текстовой информации. Анализ эмоционального состояния автора в текстах со смешанным кодом представляет собой сложную задачу, так как обычные методы предварительной обработки данных, такие как морфологический анализ, недостаточны. Это происходит потому, что данные со смешанным кодом не имеют строгой грамматической структуры и могут содержать скрытые лексические элементы.

Основными проблемами анализа эмоционального содержания текста, а именно извлечения настроений в смешанном социальном тексте со смешанным кодом, являются:

- отсутствие строгой грамматической структуры и порядка слов в предложениях со смешанным кодом;
- различные варианты написания слов, без правил орфографии, что затрудняет нормализацию при анализе;
- креативные варианты написания и орфографии, которые создают дополнительные сложности при анализе настроений;
- использование аббревиатур, которые нужно учитывать при анализе;
- отсутствие заглавных букв, что затрудняет идентификацию начала предложений.

С другой стороны, контроль эмоционального содержания сообщений дает возможность своевременно выявлять авторов текстов, находящихся в нестабильном эмоциональном состоянии, что позволит своевременно предотвращать различные чрезвычайные ситуации как в социальной сфере, так и в сфере государственной безопасности [3].

Для разрешения указанной проблемы требуется решить следующие частные задачи.

1. Классифицировать данные со смешанным кодом и текстовые данные, используя усовершенствованный алгоритм проверки орфографии.
2. Построить словарь лексики для этого смешанного корпуса слов и нормализовать слова орфографическими вариациями в корпусе с помощью метрики расстояния Левенштейна.
3. Применить различные методы машинного обучения для извлечения тональностей и решить проблему дисбаланса классов, используя методы выборки.

КЛАССИФИКАЦИЯ ЭМОЦИОНАЛЬНОГО СОДЕРЖАНИЯ ТЕКСТА

В интересах решения поставленных задач был проведен обзор литературы зарубежных авторов в области сентиментального анализа (*sentimental analysis*) одноязычных данных, сентиментального анализа данных со смешанным кодом, а также в области дисбаланса классов при сентиментальном анализе [4, 5]. В качестве концептуальных основ анализа эмоционального содержания текста предлагается использовать элементы теории сентиментального анализа.

В начале XXI века анализ эмоционального содержания был сложной задачей в области обработки естественного языка. Первые работы в этой области были посвящены маркетингу. Например, сентиментальный анализ использовался в исследованиях управления для выведения цены продукта, для автоматического определения мнения о продуктах, прогнозирования цен и получения обратной связи [6].

Анализ эмоционального содержания возможен на трех уровнях, к которым относятся: уровень документа, уровень предложения и уровень сущности. Методы анализа на всех этих уровнях можно разделить на три категории, а именно: подходы, основанные на словарях, методы машинного обучения и гибридные подходы. Подходы, основанные на словарях, в основном сосредоточены на предопределенных лексиконах [7]. Словарные подходы могут хорошо работать с одноязычными данными, поскольку стандартные лексиконы строятся и хранятся в словаре. Словарные подходы не требуют обучающих данных и крайне сложны для междоменных или многоязычных данных [8].

Представленные подходы не являются универсальными, так, например, для анализа эмоционального окраса одноязычных данных хорошо подходят методы машинного обучения, такие как контролируемый, неконтролируемый и полуконтролируемый подходы. Однако основным недостатком методов машинного обучения является необходимость в большом объеме обучающей выборки, специфичной для конкретной области.

Для решения проблемы дисбаланса классов были предложены различные гибридные методы машинного обучения, такие как ROSE, методы избыточной выборки, методы ресамплинга векторного пространства и т. д. Считается, что метод избыточной выборки решает проблему дисбаланса классов для данных со смешанным кодом социального текста. В настоящее время расстояние Левенштейна до сих пор не использовалось в качестве метода предварительной обработки для решения орфографических вариаций в смешанных данных. Кроме того, методы ресамплинга никогда не применялись для данных со смешанным кодом с целью решения проблемы дисбаланса классов.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ИССЛЕДУЕМЫХ МЕТОДОВ

Для практической реализации предлагаемого в статье подхода эмоционального анализа текста был создан двуязычный набор данных из социального текста со смешанным кодом. Набор данных состоял из 15 744 предложений и был разделен на три категории: 11 335 предложений рассматриваются как обучающие данные, 1 260 предложений рассматрива-

ются как валидационный набор и 3 149 предложений используются в качестве тестовых данных. Настройки, присутствующие в наборе данных, разделены на четыре категории (табл. 1), а именно: положительные, отрицательные, смешанные чувства и неизвестное состояние. Предлагаемая архитектура данного метода показана на рис. 1.

Таблица 1

Описание набора данных

Категории	Обучающие данные	Данные проверки	Тестовые данные
Положительная	7627	856	2076
Отрицательная	1816	195	597
Смешанные чувства	1283	141	377
Неизвестное состояние	609	68	173



Рис. 1. Архитектура предлагаемой методологии

Предварительная обработка текста является важным шагом, который позволяет преобразовать и извлечь значимую информацию из данных. Метод предварительной обработки (также называемый очисткой данных) устраняет ошибки и несоответствия, присутствующие в данных [9]. Стоит отметить, что грубая очистка данных влияет на точность распознавания.

На **первом этапе** предварительной обработки необходимо произвести классификацию предложений и удалить специальные символы.

Алгоритм классификации предложений используется для предложений со смешанным кодом S_{sm} и несмешанных предложений S_{nm} . Все предложения $S = S_{sm} \cup S_{nm}$ даются в качестве входных данных для алгоритма и делятся на массивы слов $\{w_1, w_2, \dots, w_n\}$. Для каждого слова в предложении проверяется, принадлежит ли оно основному языку или нет, с помощью детектора языка. Предложение, содержащее слова неосновного языка, считается предложением со смешанным кодом.

Необходимо учитывать, что в социальных сетях люди, как правило, используют много вариантов одного слова, чтобы выразить свои разнообразные эмоции. Например, люди вводят слово «вау», чтобы выразить свою повышенную степень эмоций. Такой вариант слов должен быть нормализован до извлечения признаков, что необходимо для более точного захвата чувств. Повторяющийся символ должен выявляться путем сравнения его с базовой словоформой. Поскольку эксперимент нацелен на обнаружение положительных эмоций и не

направлен на классификацию различных степеней в положительных эмоциях, повторяющиеся слова удаляются как часть процедуры нормализации.

На **втором этапе** предварительной обработки вычисляется расстояние Левенштейна. Расстояние Левенштейна выясняет минимальное количество односимвольных правок, которое требуется для нормализации его с базовым словом [10]. Расстояние Левенштейна имеет четыре операции, а именно: идентификацию, вставку, подстановку и удаление.

Пусть $d(i, j)$ – расстояние между символами слова w_i и символами слова w_j . Например, $w_1 =$ Талайвар и $w_2 =$ Thalairar – два слова, где w_1 – исходное слово, а w_2 – целевое (базовое слово), $w_1[1... m]$ и $w_2[1... n]$, где m и n – длина слов. Когда каждый символ в w_1 сравнивается с целевым словом w_2 , символ 'h' добавляется в w_2 чтобы обеспечить соответствие w_1 . Минимальное расстояние редактирования, необходимое для нормализации слова от источника до целевой строки, равно 1. Установлено максимальное расстояние редактирования как 2, замечено, что когда расстояние редактирования больше 2, слово превращается в другое слово, не соответствующее значению базового слова. Эти процедуры нормализации помогли снизить вычислительную сложность:

$$d(0,0) = 0, \quad d(i,j) = \min \begin{cases} d(i-1, j) + 1 & \text{стирание} \\ d(i, j-1) + 1 & \text{вставка} \\ d(i-1, j-1) + 1 & \text{замещение} \end{cases}.$$

Термин «Частота» и «Обратная частота» документа используется в методе преобразования текста в векторную форму Tf-Idf. Метод Tf-Idf предложен Джонсом в 1972 г. и полезен для поиска информации и процесса классификации текста. При этом рассчитываются статистические меры, позволяющие присвоить вес каждому слову в корпусе. Частота (Tf) определяется как количество раз, когда слово встречается в документе, тогда как обратная частота документа (Idf) увеличивает вес редко встречающихся слов, но уменьшает вес часто встречающихся неважных слов. Извлечение функций для анализа сентиментального содержания может быть выполнено с помощью Bag of Words (BoW), Word2vec, Global Vector Representation (GloVe). BoW придает больший вес часто встречающимся словам в документе. Word2Vec, GloVe являются предварительно обученной моделью для преобразования текста в вектор. Поскольку это смешанные данные с кодом, предварительно обученные встраивания слов недоступны. Кроме того, смешанные кодовые данные обычно содержат слова, которые имеют меньшую частоту, но нуждаются в весе, и, следовательно, Tf-Idf был выбран для извлечения функций [11].

После завершения методов предварительной обработки следующей задачей является применение алгоритмов машинного обучения для классификации тональности данных со смешанным кодом. Есть, по крайней мере, две проблемы, которые могут возникнуть при применении алгоритмов машинного обучения для любых данных. Первая задача заключается в том, чтобы найти подходящую технику извлечения признаков, а вторая – найти подходящий алгоритм классификации. При выборе наиболее подходящих методов извлечения признаков любой алгоритм классификации может классифицировать настройки из данных, смешанных с кодом. Эксперимент проведен с использованием различных алгоритмов классификации, а именно: вероятностных моделей (наивный байесовский классификатор (NB)) и линейного классификатора (классификатор опорных векторов машин (SVM)), основанных на решениях (random Forest Classifier и классификатор XGBoost) и статистической модели (логистическая регрессия).

Точность F1-Score и Accuracy являются обычно используемыми оценочными мерами для оценивания ошибок классификации, но при использовании алгоритмов машинного обучения для несбалансированного набора данных должна быть выбрана соответствующая метрика оценки [12]. Были проанализированы различные метрики оценки, такие как точность, балл F1 и макро-средний балл F1 (среднее значение балла F1). Поскольку точность и балл

F1 не являются предпочтительными метриками для оценки данных о дисбалансе классов, макро-средний балл F1 выбирается вместе с отзывом и точностью в качестве оценочных метрик.

F1 Score – это взвешенное среднее значение точности и запоминаемости. Чтобы подчеркнуть важность идентификации данных со смешанным кодом при анализе тональностей идентифицировали настроения со смешанными данными кода и без них.

В целях проведения анализа эмоциональности без разделения смешанных и некодовых смешанных текстов был подготовлен набор данных, состоящий из 11 335 обучающих предложений и 3 149 тестовых предложений. Использовались два метода ресамплинга, а именно методы SMOTE и ADASYN, и их производительность была сопоставлена. В табл. 2 представлен результат, полученный с использованием метода выборки SMOTE, а в табл. 3 приведены результаты, полученные с помощью метода ADSYN. Исходя из представленных результатов можно сделать вывод, что эти методы ресамплинга улучшили F1-балл на 50%.

Таблица 2

Значение F1-балла с использованием метода SMOTE

Модель	Положительная	Отрицательная	Смешанные чувства	Неизвестное состояние
Классификатор случайных лесов	0,81	0,25	0,04	0
Логистическая регрессия	0,73	0,26	0,11	0
Классификатор XGBoost	0,8	0,28	0,02	0
Опорные вектора	0,8	0,22	0,08	0
Наивный Байес	0,9	0,3	0	0

Таблица 3

Значение F1-балла по методике ADASYN

Модель	Положительная	Отрицательная	Смешанные чувства	Неизвестное состояние
Классификатор случайных лесов	0,81	0,24	0,03	0,02
Логистическая регрессия	0,81	0,26	0,03	0
Классификатор XGBoost	0,8	0,26	0,02	0,02
Опорные вектора	0,8	0,21	0,08	0
Наивный Байес	0,89	0,21	0	0

Из анализа табл. 2 и 3 видно, что по сравнению с другими методами логистическая регрессия работает с различными классами, тогда как наивный Байес не может предсказать другие классы, кроме положительных. Кроме того, можно заметить, что даже после применения методов выборки алгоритмы классификации смещены в сторону положительного класса. Этот дисбаланс классов обусловлен неразделением смешанных и некодовых смешанных данных [13].

В целях проведения анализа эмоциональности после разделения классификационных кодовых смешанных и некодовых смешанных данных была сформирована выборка из 15 744 предложений, при этом 541 предложение представляет собой предложения без кода, которые идентифицируются и удаляются перед предварительной обработкой данных. Это привело к лучшему распределению настроений по всем категориям, что очень хорошо видно из табл. 4 и 5, где был получен повышенный балл F1 для каждого класса, а также к улучшению усредненного балла F1, рассчитанного для всех классов. Среднее значение F1-балла увеличилось на 2% после удаления данных, не связанных со смешанным кодом.

Таблица 4

**Значение F1-балла с использованием метода SMOTE
(до применения расстояния Левенштейна)**

Модель	Положительная	Отрицательная	Смешанные чувства	Неизвестное состояние
Классификатор случайных лесов	0,7	0,34	0,24	0,12
Логистическая регрессия	0,68	0,34	0,29	0,26
Классификатор XGBoost	0,79	0,27	0,2	0,26
Опорные вектора	0,8	0,17	0,22	0,19
Наивный Байес	0,8	0,4	0	0

Таблица 5

**Значение F1-балла по методике ADASYN
(до применения расстояния Левенштейна)**

Модель	Положительная	Отрицательная	Смешанные чувства	Неизвестное состояние
Классификатор случайных лесов	0,81	0,28	0,24	0,08
Логистическая регрессия	0,81	0,28	0,23	0,12
Классификатор XGBoost	0,8	0,29	0,23	0,12
Опорные вектора	0,8	0,22	0,21	0,1
Наивный Байес	0,78	0,3	0	0

После удаления данных, не связанных со смешанным кодом, было отмечено, что методы выборки работают лучше даже для категории «Смешанные чувства», по сравнению с предыдущими табл. 4 и 5, из-за использования методов ресамплинга SMOTE и ADASYN. Но было замечено, что классовый дисбаланс все еще существует, несмотря на все эти усилия. До сих пор все эксперименты проводились без учета этапа предварительной обработки расстояния Левенштейна. Стоит отметить, что расстояние Левенштейна играет важную роль в идентификации данных, смешанных с кодом. Как известно, расстояние Левенштейна помогает минимизировать орфографические ошибки, используя минимальное расстояние редактирования. В данных со смешанным кодом орфографические вариации являются серьезной проблемой, но могут быть смягчены с помощью расстояния Левенштейна. В табл. 6 и 7 представлены результаты использования методов после применения расстояния Левенштейна.

Таблица 6

**Значение F1-балла с использованием метода SMOTE
(после применения расстояния Ливенштейна)**

Модель	Положительная	Отрицательная	Смешанные чувства	Неизвестное состояние
Классификатор случайных лесов	0,8	0,44	0,34	0,18
Логистическая регрессия	0,68	0,37	0,19	0,16
Классификатор XGBoost	0,8	0,44	0,21	0,22
Опорные вектора	0,8	0,43	0,24	0,18
Наивный Байес	0,8	0,3	0	0

Таблица 7

**Значение F1-балла по методике ADASYN
(после применения расстояния Ливенштейна)**

Модель	Положительная	Отрицательная	Смешанные чувства	Неизвестное состояние
Классификатор случайных лесов	0,81	0,36	0,22	0,06
Логистическая регрессия	0,81	0,39	0,12	0,12
Классификатор XGBoost	0,8	0,29	0,13	0,21
Опорные вектора	0,8	0,34	0,21	0,2
Наивный Байес	0,78	0,32	0	0

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 2 показана производительность каждого отношения с использованием различных подходов машинного обучения.

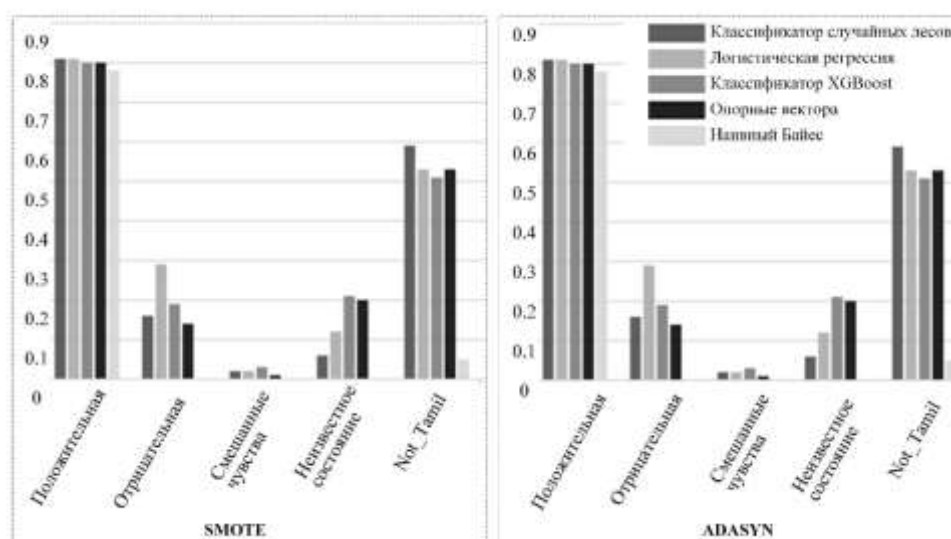


Рис. 2. Результаты всех отношений с использованием подходов машинного обучения

Расстояние Левенштейна преодолело орфографические ошибки, присутствующие в данных, и многие сильные особенности для каждого класса в некоторой степени облегчили проблему классового дисбаланса. Кроме того, было отмечено, что один алгоритм машинного обучения работает лучше для конкретного класса и не работает хорошо при рассмотрении всех классов. Это было основной причиной попыток многих классификаторов машинного обучения проверить их многоклассовую обработку. Из всех методов машинного обучения логистическая регрессия показала лучшую производительность по сравнению с остальными классификаторами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрен подход к анализу эмоционального содержания текста со смешанным кодом. В качестве метода предварительной обработки смешанных данных предложено использовать расстояние Левенштейна. Это улучшило результаты, поскольку данный метод хорошо работал с выявлением вариантов орфографии, которые сохранялись в смешанных данных, написанных в социальных сетях. Полученные данные показали, что проблему дисбаланса классов можно облегчить, удалив смешанные данные, не относящиеся к коду. Сочетание расстояния Левенштейна с методами выборки помогло увеличить F1-Score. Дальнейшая работа может быть направлена на улучшение оценки F1 путем поиска сильных методов извлечения признаков или гибридных подходов, которые могут помочь решить проблему дисбаланса класса, существующую в смешанных с кодом социальных текстовых данных.

Список используемых источников

1. Анализ настроений экстремизма в социальных сетях на основе текстовой информации / М. Асиф [и др.]. // *Телематика и информатика*. – 2020. – Т. 48. – С. 70–77. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.tele.2020.101345> (дата обращения: 02.02.2023).
2. Денисова Е. А. Смешение языковых кодов в англоязычной литературе // *Дискурс профессиональной коммуникации*. – 2020. – Вып. 2-1. – С. 49–57. – URL: <https://pdc-journal.com> (дата обращения: 04.02.2023).
3. Насукава Т., Йи Д. Анализ настроений: захват благоприятности с использованием обработки естественного языка // *Труды 2-й международной конференции по сбору знаний*. – 2003. – Вып. 11. – С. 70–77. – URL: <https://doi.org/10.1145/945645.945658> (дата обращения: 02.02.2023).
4. Понимание классификации с несбалансированными данными: эмпирические результаты и современные тенденции использования внутренних характеристик данных / В. Лопес. [и др.] // *Информационные науки*. – 2013. – Т. 250. – С. 113–141. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2013.07.007> (дата обращения: 02.02.2023).
5. Лу Я., Чунг Ю. Индекс влияния дисбаланса Байеса: мера несбалансированного набора данных класса для задачи классификации // *Сборник трудов Института инженеров электротехники и электроники (IEEE)*. – 2019. – № 31(9). – С. 3525–3539.
6. Абашева И. В. Проблемные вопросы анализа текста со смешанным кодом // *Флагман науки*. – 2023. – № 4(4). – С. 623–637.
7. Сабатин С., Талавейра М., Жоан П. Смешанные тексты: креолизованный vs поликодовый vs мультимодальный // *Филологические науки. Вопросы теории и практики*. – 2022. – Вып. 6. – С. 2017–2023. – URL: <https://doi.org/10.30853/phil20220297> (дата обращения: 02.02.2023).
8. Клековкина М. В. Методы и перспективные направления исследований в задаче автоматической классификации текстов по эмоциям // *Материалы Международной научно-*

практической конференции молодых ученых «Молодежь и наука XXI века». – 2010. – С. 331–335.

9. *Нгуен Т., Нгуен Л., Цао Т.* Анализ тональности медицинского текста с использованием комбинации машинного обучения и оценки SO-CAL // Сборник трудов Азиатско-Тихоокеанского симпозиума по интеллектуальным и эволюционным системам. – 2017. – С. 49–56. – URL: <https://doi.org/10.1109/IESYS.2017.8233560> (дата обращения: 02.02.2023).

10. *Карахтанов Д. С.* Программная реализация алгоритма с использованием метода выборки в сочетании с метриками расстояния Левенштейна // Молодой ученый. – 2010. – № 8(19), т. 1. – С. 158–162. – URL: <https://moluch.ru/archive/19/1966/> (дата обращения: 03.02.2023).

11. *Абашева И. В.* Модель структурно-семантических особенностей источников новостного текстового контента телекоммуникационных сетей с учетом особенностей лингвистической интерференции // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2021. – Вып. 679. – С. 106–114.

12. Обучение на несбалансированных по классам данных: обзор методов и приложений / Г. Хайсян [и др.] // Экспертные системы с приложениями. – 2017. – Т. 73. – С. 220–239. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.12.035> (дата обращения: 02.02.2023).

13. *Баймаханбетов М. А., Оспанова У. А., Булдыбаев Т. К.* ADASYN как метод решения проблемы несбалансированности данных при sentiment-анализе текстовой информации // Современное педагогическое образование. – 2009. – Вып. 12. – С. 160–164.

В. А. Шемелов,
кандидат технических наук, доцент;
А. Н. Ефременко,
кандидат технических наук, доцент;
Л. Д. Рослов

К ВОПРОСУ О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАННЫХ РЕАНАЛИЗА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СТАТИСТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ПОЛЕЙ ПАРАМЕТРОВ ТРОПОСФЕРЫ

В статье приводятся результаты исследования пригодности данных реанализа для использования их в качестве альтернативы данным радиозондовых наблюдений при изучении статистической структуры полей параметров тропосферы. Расчеты проводились в интегрированной среде разработки программ R Studio с использованием языка программирования R, с помощью которого проведена статистическая проверка гипотез о равенстве основных числовых характеристик температуры воздуха, геопотенциальной высоты изобарических поверхностей, направления и скорости ветра в тропосфере по данным реанализа и радиозондовых наблюдений при различных периодах осреднения.

Ключевые слова: данные реанализа, данные радиозондовых наблюдений, числовые характеристики, методы проверки гипотез, критерии.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время при исследовании климата широко используются данные реанализа, которые, в отличие от результатов метеорологических наблюдений, не требуют предварительной проверки качества, так как являются продуктом процедуры усвоения данных перед использованием их в качестве начальных условий в гидродинамических моделях. Преимуществом данных реанализа также является гораздо большее пространственное и временное разрешение по сравнению с результатами наблюдений.

Анализ современных публикаций [1, 2] по использованию данных реанализа в климатических исследованиях показал, что не для всех метеорологических параметров рекомендуется их использование вместо результатов наблюдений. Так, например, в статье [1] для расчета режима волнения Мирового океана предлагается вводить поправки для скорости ветра у поверхности моря для приведения их в соответствие к результатам наблюдений. В статье [2] рассматриваются американский реанализ NOAA-CIRES TwentiethCentury Reanalysis (NOAA20C) и два европейских реанализа ECMWF ERA20C и CERA20C. Отмечается, что для периода современного потепления изменения приземной температуры в трех реанализах относительно хорошо согласуются между собой и с данными прямых наблюдений везде, за исключением высоких широт Северного полушария. Однако для предшествующих периодов выявлены существенные различия в пространственной структуре климатических трендов и их значениях для различных регионов Северного полушария, которые наиболее ярко выражены в его высоких широтах. Данные факты свидетельствуют о том, что в различные периоды времени и в разных географических районах данные реанализов по-разному согласуются с данными наблюдений.

Авторы настоящей работы проводят исследования по изучению статистической структуры полей температуры воздуха, геопотенциальной высоты, направления и скорости ветра в тропосфере. В связи с этим возник вопрос о правомерности использования данных реанализа вместо данных радиозондовых наблюдений в такого рода исследованиях. Анализ публикаций [3, 4], авторы которых используют данные реанализа при исследовании климата, не дал

исчерпывающего ответа на этот вопрос. Целью данной работы является исследование пригодности данных реанализа для использования их вместо данных радиозондовых наблюдений при исследовании статистической структуры указанных параметров тропосферы.

ДАнные И МЕТОды ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве данных реанализа в настоящем исследовании использовались данные NCEP/NCAR Reanalysis 1, полученные Национальными центрами прогнозирования окружающей среды (NCEP), Национальным центром атмосферных исследований (NCAR) и Министерством энергетики (DOE) США в рамках проекта Reanalysis 1. Данные NCEP/NCAR Reanalysis 1 представляют собой выходные данные атмосферной модели, полученные четыре раза в сутки в глобальном масштабе с 1948 г. по настоящее время на основных изобарических поверхностях и других уровнях в атмосфере с шагом по времени 6 ч [5]. Пространственное покрытие данных реанализа составляет по долготе от $0,0^{\circ}$ до $357,5^{\circ}$ в. д. и по широте от $90,0^{\circ}$ с. ш. до $90,0^{\circ}$ ю. ш. На указанной пространственной области задана сетка, имеющая 144 узла по долготе и 73 узла по широте, что обеспечивается шагом сетки по широте и долготе, равным $2,5^{\circ}$. Нумерация узлов сетки начинается с ее верхнего левого угла.

Данные радиозондовых наблюдений были взяты с сайта ВНИИГМИ-МЦД. Эти данные представляют собой массив срочных данных радиозондовых наблюдений, прошедших процедуру комплексного контроля, по 12 станциям Глобальной системы наблюдений за климатом территории Российской Федерации за период с 1978 г. по настоящее время [6]. Особенностью этих данных является то, что каждое значение параметра атмосферы сопровождается значением показателя качества, по которому видно – можно доверять конкретному значению в массиве данных или нет.

На основе данных реанализа и радиозондовых наблюдений были сформированы синхронизированные по срокам выборки данных на изобарических поверхностях 850, 700, 500, 400 и 300 гПа за шесть лет (с 2017 по 2022 г.) следующих параметров атмосферы:

- геопотенциальной высоты изобарической поверхности;
- температуры воздуха;
- направления и скорости ветра.

Так как данные радиозондирования представлены за 0 и 12 часов UTC, то данные реанализа также были использованы за 0 и 12 часов UTC соответственно.

Для синхронизации данных радиозондовых наблюдений и реанализа каждой станции Глобальной системы наблюдений за климатом территории Российской Федерации был поставлен в соответствие определенный узел сетки данных реанализа. Сведения о соответствии станций, проводивших радиозондирование атмосферы, и узлов сетки реанализа приведены в табл. 1.

Таблица 1

Соответствие станций радиозондирования атмосферы и узлов сетки реанализа

Данные станций радиозондирования				Данные узлов сетки реанализа			
Индекс	Название	Широта, $^{\circ}$ с. ш.	Долгота, $^{\circ}$ в. д.	Широта, $^{\circ}$ с. ш.	Номер по широте	Долгота, $^{\circ}$ в. д.	Номер по долготе
22543	Архангельск	64,58	40,50	65,00	11	40,00	17
29862	Хакасская	53,77	91,32	55,00	15	92,50	38
23921	Ивдель	60,68	60,43	60,00	13	60,00	25
30230	Киренск	57,77	108,12	57,50	14	107,50	44
27459	Нижний Новгород	56,27	44,00	57,50	14	45,00	19
31088	Охотск	59,37	143,20	60,00	13	142,50	58
28695	Омск	54,93	73,40	55,00	15	72,50	30

Окончание табл. 1

Данные станций радиозондирования				Данные узлов сетки реанализа			
Индекс	Название	Широта, ° с. ш.	Долгота, ° в. д.	Широта, ° с. ш.	Номер по широте	Долгота, ° в. д.	Номер по долготе
35121	Оренбург	51,70	55,10	52,50	16	55,00	23
20674	Остров Диксон	73,50	80,42	72,50	8	80,00	33
32540	Петропавловск- Камчатский	53,08	158,58	52,50	16	157,50	64
23472	Туруханск	65,78	87,95	65,00	11	87,50	36
24266	Верхоянск	67,55	133,38	67,50	10	132,50	54

В соответствии с рекомендациями, приведенными в работе [7], однородными считались данные, сгруппированные ежемесячно для переходных сезонов года и посезонно для основных сезонов года, поэтому выборки данных для исследования формировались отдельно для лета и зимы, марта, апреля, мая, сентября, октября и ноября соответственно. Также дополнительно были сформированы выборки за рассматриваемые шесть лет и за каждый из исследуемых годов отдельно.

Таким образом, для выбранных уровней и параметров атмосферы были сформированы выборки, идентифицируемые следующими параметрами:

- типом данных (радиозондовых наблюдений или реанализа);
- номером станции радиозондирования или номером узла сетки реанализа;
- уровнем атмосферы (850, 700, 500, 400 и 300 гПа);
- параметром атмосферы (температура воздуха, геопотенциальная высота, направление и скорость ветра);
- периодом осреднения данных – шесть лет, с 2017 по 2022 г. и один год. Период осреднения «шесть лет» использован для данных за сроки наблюдений в течение всех шести лет, а также для данных за сроки наблюдений летом, зимой, шесть месяцев весны и осени, а период осреднения один год – для данных за сроки наблюдений в течение календарного года, начиная с 2017 по 2022 г.

С учетом количества возможных значений указанных параметров выборок было сформировано 2160 синхронизированных по срокам пар выборок радиозондовых наблюдений и реанализа.

Поскольку данные радиозондовых наблюдений и реанализа можно рассматривать как реализации случайных величин, то об их схожести можно судить по идентичности законов распределения. Однако для обоснования возможности использования данных реанализа вместо данных наблюдений, на наш взгляд, достаточно доказать равенство их числовых характеристик рассеивания и положения. В качестве числовой характеристики положения, определяющей сходство данных радиозондовых наблюдений и реанализа, было выбрано математическое ожидание, а в качестве числовой характеристики рассеивания – дисперсия. Для доказательства равенства указанных числовых характеристик использовались методы статистической проверки гипотез.

В основе методов проверки гипотез лежит тот или иной критерий, представляющий собой математическое правило, согласно которому принимается или отвергается выдвинутая гипотеза. Критерии, используемые при проверке гипотез, еще называют тестами. Критерии, используемые при статистической проверке гипотез, можно разделить на две группы: параметрические и непараметрические. Параметрические критерии получены при условии знания закона распределений генеральной совокупности, выборка из которой подвергается исследованию, а непараметрические критерии не предполагают наличия информации о законе распределения генеральной совокупности. Многие исследователи отдают предпочтение непара-

метрическим критериям, справедливо полагая, что получить достоверную информацию о законе распределения генеральной совокупности на практике очень часто не представляется возможным [8]. Наряду с этим утверждением, другие исследователи отмечают, что некоторые параметрические критерии при увеличении объема выборки становятся не чувствительными к отклонениям от постулируемого закона распределения генеральной совокупности и ими можно пользоваться в любых ситуациях [9].

Для статистической проверки гипотез о равенстве дисперсий температуры воздуха и геопотенциальной высоты по данным наблюдений и реанализа в работе использовался критерий Левене [10]. Если гипотеза о равенстве дисперсий подтверждалась, то проверка гипотезы о равенстве математических ожиданий температуры воздуха и геопотенциальной высоты по данным наблюдений и реанализа проводилась с помощью двухвыборочного критерия Стьюдента [9], в противном случае – с использованием критерия Крамера – Уэлча [15]. Также в дополнение к критериям Стьюдента и Крамера – Уэлча для проверки гипотез о равенстве математических ожиданий температуры воздуха и геопотенциальной высоты по данным наблюдений и реанализа использовался непараметрический критерий Вилкоксона – Манна – Уитни [9].

Выбор этих критериев для статистической проверки гипотез однородности числовых характеристик температуры воздуха и геопотенциальной высоты был обусловлен следующими соображениями: критерии Левене, Стьюдента и Крамера – Уэлча являются параметрическими критериями, полученными в предположении, что анализируемые выборки получены из генеральных совокупностей, подчиненных нормальному закону распределения. Однако при больших объемах выборок эти критерии становятся нечувствительными к отклонениям распределения генеральной совокупности от нормального распределения [8–11], поэтому проверка гипотез о нормальности распределения анализируемых генеральных совокупностей не проводилась. Критерий Вилкоксона – Манна – Уитни является непараметрическим, не требует проверки гипотезы о типе закона распределения генеральных совокупностей, поэтому использовался для дополнительной проверки результатов параметрических критериев.

Что касается ветра, то статистическая проверка гипотез для этого параметра атмосферы проводилась в два этапа.

На первом этапе интервал возможных значений направления ветра разбивался на градации. Затем для каждой градации проверялась гипотеза о равенстве вероятностей принадлежности к этой градации направления ветра по данным радиозондовых наблюдений и реанализа. Если для всех градаций указанная гипотеза подтверждалась, то на втором этапе для каждой градации проверялась гипотеза о равенстве математических ожиданий скорости ветра по данным радиозондовых наблюдений и реанализа.

При выборе критерия о статистической проверке гипотезы равенства вероятностей принадлежности к выбранным градациям направления ветра по данным радиозондовых наблюдений и реанализа исходили из того, что распределение скорости ветра по градациям по результатам n наблюдений можно рассматривать как серию из n независимых испытаний в схеме Бернулли. В результате каждого испытания направление ветра может принадлежать только одной градации. Так как после завершения серии испытаний можно определить частоту принадлежности направления ветра к каждой градации, являющейся оценкой вероятности параметра P биномиального распределения, то для статистической проверки гипотез о равенстве вероятностей принадлежности к выбранным градациям направления ветра по данным радиозондовых наблюдений и реанализа использовался критерий проверки гипотез о численном значении параметра P биномиального распределения [9, 16]. При проверке гипотез о равенстве математических ожиданий скорости ветра использовались те же критерии, что для температуры воздуха и геопотенциальной высоты.

Элементами любого критерия проверки гипотез являются:

– показатель согласованности \hat{u} выборки (выборок для двухвыборочных критериев) с нулевой гипотезой H_0 , значение которого u^* представляет собой статистику выборки (выборок для двухвыборочных критериев);

– закон распределения показателя согласованности \hat{u} при условии истинности нулевой гипотезы H_0 , например в виде плотности распределения $\varphi_{\hat{u}/H_0}(u)$;

– тип критической области, которая может быть лево-, право- и двухсторонней.

Критическая область U_k – это область возможных значений U показателя согласованности \hat{u} , при попадании в которую u^* нулевая гипотеза отвергается. Напротив, область принятия решений $U \setminus U_k$ – это область, при попадании в которую u^* принимается гипотеза H_0 . Формирование областей U_k и $U \setminus U_k$ определяется типом критической области и уровнем значимости α , который равен вероятности ошибочно отвергнуть нулевую гипотезу H_0 при ее истинности. Уровень значимости α задает пользователь, его общепринятым значением является 0,05 [9, 14].

Классическое правило проверки гипотез имеет вид [9, 14]:

$$\begin{cases} u^* \in U \setminus U_k \Rightarrow \tilde{H}_0 - \text{принята гипотеза } H_0, \\ u^* \in U_k \Rightarrow \tilde{H}_1 - \text{принята гипотеза } H_1 \text{ (гипотеза } H_0 \text{ отвергнута)}. \end{cases} \quad (1)$$

В современном программном обеспечении статистического анализа данных используется другое правило проверки гипотез [13, 18]:

$$\begin{cases} P\text{-значение} > \alpha \Rightarrow \tilde{H}_0 - \text{принята гипотеза } H_0, \\ P\text{-значение} < \alpha \Rightarrow \tilde{H}_1 - \text{принята гипотеза } H_1 \text{ (гипотеза } H_0 \text{ отвергнута)}. \end{cases} \quad (2)$$

Для лево- и правосторонней критических областей P -значение вычисляется следующим образом:

$$P\text{-значение} = P[(\hat{u} < u^*)/H_0] = F_{\hat{u}/H_0}(u^*), \quad (3)$$

$$P\text{-значение} = P[(\hat{u} > u^*)/H_0] = 1 - F_{\hat{u}/H_0}(u^*), \quad (4)$$

а для двухсторонней симметричной критической области P -значение удваивается:

$$P\text{-значение} = 2P[(\hat{u} > |u^*|)/H_0] = 2(1 - F_{\hat{u}/H_0}(u^*)), \quad (5)$$

где $F_{\hat{u}/H_0}(u)$ – функция распределения показателя согласованности \hat{u} при условии истинности нулевой гипотезы H_0 .

Геометрический смысл P -значения и критических областей показан на рис. 1.

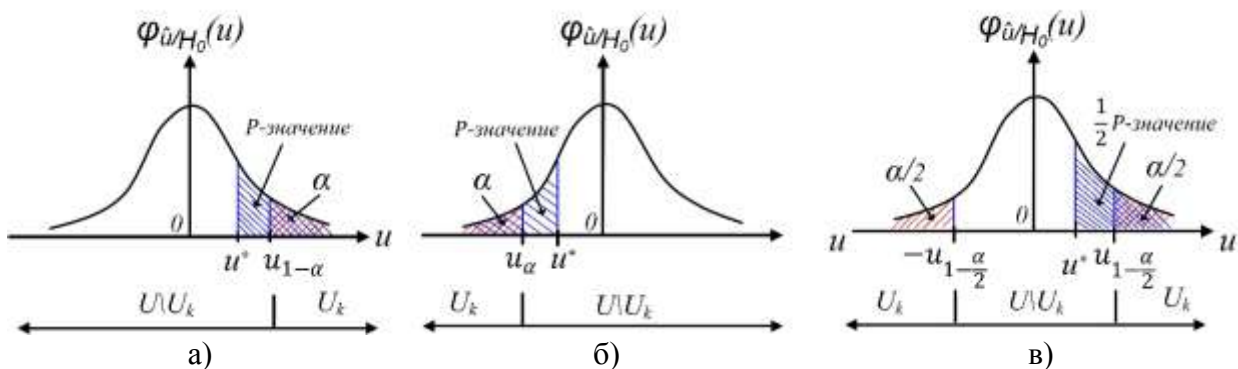


Рис. 1. Геометрический смысл P -значения и критических областей:
 а – правосторонняя критическая область; б – левосторонняя критическая область;
 в – двухсторонняя критическая область

На рис. 1 использованы следующие обозначения:

$\varphi_{\hat{u}/H_0}(u)$ – плотность распределения показателя согласованности \hat{u} при условии истинности нулевой гипотезы H_0 ;

U_k – критическая область значений показателя согласованности \hat{u} (область принятия гипотезы H_1);

$U \setminus U_k$ – область допустимых значений показателя согласованности \hat{u} (область принятия гипотезы H_0);

α – уровень значимости критерия статистической проверки гипотез [$\alpha = P(\hat{u} \in U_k / H_0)$], который определяет границы критических областей: u_α – для левосторонней критической области, $u_{1-\alpha}$ – для правосторонней критической области и $u_{1-\frac{\alpha}{2}}$ – для двусторонней критической области;

$u_\alpha, u_{1-\alpha}, u_{1-\frac{\alpha}{2}}$ – $(\alpha)100\%$, $(1-\alpha)100\%$ и $(1-\frac{\alpha}{2})100\%$ квантили показателя согласованности \hat{u} ;

u^* – выборочное значение показателя согласованности.

Решающие правила (1) и (2) эквивалентны друг другу. Однако решающее правило (2) позволяет оценить статистическую значимость принятого решения, так как P -значение – это, по сути, вероятность ошибочно отвергнуть нулевую гипотезу при условии ее истинности на основе имеющейся выборки.

Приведем сведения об элементах критериев статистической проверки гипотез, использованных в данной работе.

Критерий Левене.

1. Нулевая и альтернативные гипотезы [10]:

$H_0: D_1 = D_2 = \dots = D_m$ – дисперсии генеральных совокупностей, из которых извлечены m выборок, равны;

$H_1: D_1 \neq D_2 \neq \dots \neq D_m$ – дисперсии генеральных совокупностей, из которых извлечены m выборок, не равны.

Здесь D_i – дисперсия i -й группы, [$i = 1(1)m$].

2. Выборочное значение u^* показателя согласованности Левене \hat{u} :

$$u^* = \frac{(N-m) \sum_{i=1}^m n_i (\bar{z}_i - \bar{z})^2}{(m-1) \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} (z_{ij} - \bar{z}_i)^2}, \quad (6)$$

где m – количество выборок;

n_i – количество вариантов в i -й выборке, [$i = 1(1)m$];

N – количество вариантов во всех выборках;

y_{ij} – значение j -го варианта i -й выборки;

z_{ij} – модуль отклонения y_{ij} от \bar{y}_i :

$$z_{ij} = |y_{ij} - \bar{y}_i|;$$

\bar{y}_i – среднее значение вариантов i -й выборки, [$i = 1(1)m$]:

$$\bar{y}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} y_{ij};$$

\bar{z}_i – среднее значение z_{ij} в i -й выборке, [$i = 1(1)m$]:

$$\bar{z}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} z_{ij};$$

\bar{z} – среднее значение z_{ij} во всех выборках,

$$\bar{z} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} z_{ij}.$$

3. Закон распределения \hat{u} при условии истинности гипотезы H_0 – распределения Фишера с $(m-1)$ и $(N-m)$ степенями свободы:

$$\hat{u} \sim \hat{f}_{(k_1, k_2)} \Leftrightarrow F_{\hat{u}/H_0}(u) = F_{\hat{f}_{(k_1, k_2)}}(u), \quad (7)$$

где $k_1 = m - 1$;

$k_2 = N - m$.

4. Критическая область U_K показателя согласованности Левена – правосторонняя:

$$U_K: u > u_{1-\alpha}, \quad (8)$$

где $u_{1-\alpha} = F_{\hat{f}(m-1, N-m)}^{-1}(1-\alpha) - (1-\alpha)100\%$ квантиль распределения Фишера с $(m-1)$ и $(N-m)$ степенями свободы.

Двухвыборочный критерий Стьюдента.

1. Нулевая и альтернативные гипотезы [9]:

$H_0: M_{\hat{x}} = M_{\hat{y}}$ – математические ожидания генеральных совокупностей, из которых извлечены выборки $X_{(n)} = \langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle$ и $Y_{(m)} = \langle y_1, y_2, \dots, y_m \rangle$, равны;

$H_1: M_{\hat{x}} \neq M_{\hat{y}}$ – математические ожидания генеральных совокупностей, из которых извлечены выборки $X_{(n)} = \langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle$ и $Y_{(m)} = \langle y_1, y_2, \dots, y_m \rangle$, не равны.

Дополнительные ограничения:

– выборки $X_{(n)}$ и $Y_{(m)}$ извлечены из генеральных совокупностей, подчиненных нормальному закону распределения (при больших n и m этим ограничением можно пренебречь);

– дисперсии генеральных совокупностей, из которых извлечены выборки $X_{(n)}$ и $Y_{(m)}$, равны $D_{\hat{x}} = D_{\hat{y}}$, но априори неизвестны.

2. Выборочное значение u^* показателя согласованности Стьюдента \hat{u} :

$$u^* = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 + \sum_{j=1}^m (y_j - \bar{y})^2}{n+m}}} \sqrt{\frac{nm(n+m-2)}{n+m}}, \quad (9)$$

где \bar{x} – среднее значение вариантов в выборке $X_{(n)}$,

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i;$$

\bar{y} – среднее значение вариантов в выборке $Y_{(m)}$,

$$\bar{y} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m y_j.$$

3. Закон распределения \hat{u} при условии истинности гипотезы H_0 – Стьюдента с $(n+m-2)$ степенями свободы:

$$\hat{u} \sim \hat{t}_{(n+m-2)} \Leftrightarrow F_{\hat{u}/H_0}(u) = F_{\hat{t}_{(n+m-2)}}(u). \quad (10)$$

4. Критическая область U_K показателя согласованности Стьюдента – двусторонняя:

$$U_K: |u| > u_{1-\alpha/2}, \quad (11)$$

где $u_{1-\alpha/2} = F_{\hat{t}_{(n+m-2)}}^{-1}(1-\alpha/2) - (1-\alpha/2)100\%$ – квантиль распределения Стьюдента с $(n+m-2)$ степенями свободы.

Критерий Крамера – Уэлча.

Критерий Крамера – Уэлча является модификацией критерия Стьюдента на случай неравенства дисперсий анализируемых генеральных совокупностей $D_{\hat{x}} \neq D_{\hat{y}}$ и отличается от критерия Стьюдента числом степеней свободы, используемым при вычислении правой границы двусторонней критической области [15]:

$u_{1-\alpha/2} = F_{\hat{t}_{df}}^{-1}(1-\alpha/2) - (1-\alpha/2)100\%$ квантиль распределения Стьюдента с df степенями свободы (от англ. *degrees of freedom* – степень свободы):

$$df = s^4 \left(\frac{1}{n+1} \left(\frac{\tilde{D}_{\hat{x}}}{n} \right)^2 + \frac{1}{m+1} \left(\frac{\tilde{D}_{\hat{y}}}{m} \right)^2 \right)^{-1} - 2, \quad (12)$$

где $\tilde{D}_{\hat{x}}$ – оценка дисперсии $D_{\hat{x}}$ по выборке $X_{(n)}$,

$$\tilde{D}_{\hat{x}} = \frac{1}{n+1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2;$$

$$\tilde{D}_{\hat{y}} - \text{оценка дисперсии } D_{\hat{y}} \text{ по выборке } Y_{(m)},$$

$$\tilde{D}_{\hat{y}} = \frac{1}{m+1} \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2.$$

Критерий Вилкоксона – Манна – Уитни.

1. Нулевая и альтернативные гипотезы [9]:

$H_0: M_{\hat{x}} = M_{\hat{y}}$ – математические ожидания генеральных совокупностей, из которых извлечены выборки $X_{(n)} = \langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle$ и $Y_{(m)} = \langle y_1, y_2, \dots, y_m \rangle$, равны;

$H_1: M_{\hat{x}} \neq M_{\hat{y}}$ – математические ожидания генеральных совокупностей, из которых извлечены выборки $X_{(n)} = \langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle$ и $Y_{(m)} = \langle y_1, y_2, \dots, y_m \rangle$, не равны.

Дополнительное требование: $n < m$.

2. Выборочное значение u^* показателя согласованности Вилкоксона – Манна – Уитни \hat{u} :

$$u^* = \frac{\gamma^{(n+m)} - \frac{1}{2}n(n+m+1)}{\sqrt{\frac{1}{12}nm(n+m)}}, \quad (13)$$

где $\gamma^{(n+m)}$ – сумма рангов, $\gamma^{(n+m)} = \sum_{i=1}^n R_i^{(1)}$;

$R_i^{(1)}$ – порядковый номер (ранг) варианта x_i вариационного ряда выборки $X_{(n)}$ в общем вариационном ряду, построенном по выборкам $X_{(n)}$ и $Y_{(m)}$.

3. Закон распределения \hat{u} при условии истинности гипотезы H_0 – нормальный с параметрами $M[\hat{\gamma}^{(n+m)}] = \frac{1}{2}n(n+m+1)$, $\sigma[\hat{\gamma}^{(n+m)}] = \frac{1}{12}nm(n+m)$:

$$\hat{u} \sim N(M[\hat{\gamma}^{(n+m)}], \sigma[\hat{\gamma}^{(n+m)}]) \Leftrightarrow F_{\hat{u}/H_0}(u) = F_{\hat{u}}^{[H]}(u; M[\hat{\gamma}^{(n+m)}], \sigma[\hat{\gamma}^{(n+m)}]). \quad (14)$$

4. Критическая область U_K показателя согласованности Вилкоксона – Манна – Уитни – двусторонняя:

$$U_K: |u| > u_{1-\alpha/2}, \quad (15)$$

где $u_{1-\alpha/2} = F_{\hat{u}}^{[H]-1}(1 - \alpha/2; M[\hat{\gamma}^{(n+m)}], \sigma[\hat{\gamma}^{(n+m)}]) - (1 - \alpha/2)100\%$ квантиль нормального распределения с параметрами $[M[\hat{\gamma}^{(n+m)}], \sigma[\hat{\gamma}^{(n+m)}]]$.

Критерий оценки вероятности параметра P биномиального распределения.

1. Основная и альтернативная гипотезы [16]:

$H_0: P_1 = P_2$ – вероятности попадания значений направления ветра по данным реанализа и радиозондовых наблюдений в выбранную градацию равны;

$H_1: P_1 \neq P_2$ – вероятности попадания значений направления ветра по данным реанализа и радиозондовых наблюдений в выбранную градацию не равны.

2. Выборочное значение показателя согласованности

$$u^* = \frac{P_1^* - P_2^*}{\sqrt{P^*(1-P^*)} \sqrt{1/n_1 + 1/n_2}}, \quad (16)$$

где P_1^* – частота попадания значений направления ветра в заданную градацию по данным реанализа;

P_2^* – частота попадания значений направления ветра в заданную градацию по данным радиозондовых наблюдений;

P^* – агрегированная частота,

$$P^* = \frac{n_1 P_1^* + n_2 P_2^*}{n_1 + n_2}.$$

3. Закон распределения показателя согласованности при условии истинности нулевой гипотезы – нормальный с параметрами $M = 0, \sigma = 1$:

$$\hat{u} \sim N(0, 1) \Leftrightarrow F_{\hat{u}/H_0}(u) = F_{\hat{u}}^{[H]}(u; 0, 1). \quad (17)$$

4. Критическая область – двусторонняя:

$$U_K: |u| > u_{1-\alpha/2}, \quad (18)$$

где $u_{1-\alpha/2} = F_{\hat{u}}^{[H]-1}(1 - \alpha/2; 0, 1) - (1 - \alpha/2)100\%$ – квантиль нормального распределения с параметрами 0, 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ПРОВЕРКИ ГИПОТЕЗ

Расчеты проводились в интегрированной среде разработки программ *R Studio* [17] с использованием языка программирования *R* [18].

Критерии Стьюдента, Крамера – Уэлча, Вилкоксона – Манна – Уитни статистической проверки гипотез реализованы в виде функций *t.test()*, *wilcox.test()* из базового пакета *stats* языка программирования *R* [18], критерий Левене – в виде функции *leveneTest()* из пакета *car* [13].

В функции *t.test()* реализованы критерии Стьюдента и Крамера – Уэлча. По умолчанию считается, что дисперсии в проверяемых выборках не равны и используется критерий Крамера – Уэлча, если дисперсии в проверяемых выборках равны, то с использованием аргумента *var.equal=TRUE* можно изменить работу функции *t.test()* и использовать критерий Стьюдента при ее вызове.

Для критерия оценки вероятности параметра *P* биномиального распределения использовалась авторская функция *DD_test()*. Чтение данных реанализа осуществлялось с помощью функций пакета *ncdf4* [19], а чтение данных радиозондовых наблюдений – с помощью функций пакета *readxl* [20].

Поскольку использованные функции возвращают *P-значение*, то для проверки гипотез использовано решающее правило (2).

Для анализа полученных результатов использован код, согласно которому, если принималась гипотеза H_0 (о равенстве числовых характеристик), то этот результат кодировался символом *T* (от англ. *true* – истинный), если H_1 , то – символом *F* (от англ. *false* – ложный). Если проверка не проводилась, то использовалось сокращение *NA* (от англ. *not available* – отсутствует).

Для температуры воздуха и геопотенциальной высоты изобарических поверхностей по результатам статистической проверки гипотез формировалась строка, соответствующая результатам проверки с использованием функций *t.test()*, *wilcox.test()* и *leveneTest()*.

Для направления ветра формировалась строка с результатом функции *DD_test()*, для скорости ветра – с результатами функций *t.test()* и *wilcox.test()*. Если для направления ветра нулевая гипотеза отвергалась, т. е. принималась гипотеза о неравенстве вероятностей распределения направлений ветра по градациям по данным реанализа и радиозондовых наблюдений, то проверка гипотезы о равенстве математических ожиданий скорости ветра в каждой градации не проводилась. В этом случае результат кодировался как *NA*.

В табл. 2 с использованием введенного кода приведены результаты статистической проверки гипотез за период осреднения «шесть лет» с 2017 по 2022 г. полного набора данных. Формат научной статьи не позволяет привести аналогичные таблицы с результатами статистической проверки гипотез для других периодов осреднения (сезоны года, октябрь, май), поэтому в табл. 3–5 приведены сведения о количестве ситуаций, когда гипотеза о равенстве математического ожидания/дисперсии отвергалась.

Таблица 2

**Результаты статистической проверки гипотез
при использовании полного набора данных за шесть лет в период с 2017 по 2022 год**

Станции радиозондирования		Параметр атмосферы	Уровень атмосферы, гПа				
Индекс	Название		850	700	500	400	300
22543	Архангельск	Температура воздуха	T T T	T T T	T T T	T T T	F F F
		Геопотенц. высота	T T T	T T T	T T T	T T T	T T T
		Направление ветра	F	F	T	T	T
		Скорость ветра	NA	NA	T T	T T	T T
29862	Хакасская	Температура воздуха	F F T	F F T	T T T	T T T	T T T
		Геопотенц. высота	F F T	F F F	F F T	F F T	T F T
		Направление ветра	F	T	F	T	T
		Скорость ветра	NA	F T	NA	T T	T T
29862	Ивдель	Температура воздуха	T T T	T T T	T T T	T T T	T T F
		Геопотенц. высота	F F T	F F T	F F T	F F T	T T T
		Направление ветра	F	T	T	T	T
		Скорость ветра	NA	F F	T T	T T	T T
30230	Киренск	Температура воздуха	T T T	T T T	T T T	T T T	T T T
		Геопотенц. высота	T T T	T T T	T T T	T T T	T T T
		Направление ветра	F	F	T	T	T
		Скорость ветра	NA	NA	T T	T T	T T
27459	Нижний Новгород	Температура воздуха	F F T	F F T	T T T	T T T	T T F
		Геопотенц. высота	F F T	F F T	F F T	T T T	T T T
		Направление ветра	F	F	F	T	T
		Скорость ветра	NA	NA	NA	F F	T T
31088	Охотск	Температура воздуха	F F T	T T T	T T T	T T T	T T T
		Геопотенц. высота	T T F	T T T	T T T	T T T	T T T
		Направление ветра	F	T	T	T	T
		Скорость ветра	NA	F F	F F	F F	F T
28695	Омск	Температура воздуха	T T T	T T T	T T T	T T T	T T F
		Геопотенц. высота	F T T	F T T	F T T	F T T	T T T
		Направление ветра	T	T	T	F	T
		Скорость ветра	T T	T T	T T	NA	T T
35121	Оренбург	Температура воздуха	T T T	T T T	T T T	T T T	F F T
		Геопотенц. высота	T T T	F F T	T T T	T T T	T T T
		Направление ветра	F	F	T	T	T
		Скорость ветра	NA	NA	T T	T T	T T
20674	Остров Диксон	Температура воздуха	T T T	T T T	T T T	T T T	F F T
		Геопотенц. высота	T T T	T T T	T F T	F F T	T F T
		Направление ветра	T	T	F	T	T
		Скорость ветра	F F	F F	NA	F F	T T
32540	Петропавловск-Камчатский	Температура воздуха	T T T	T T T	T T T	T T T	T T T
		Геопотенц. высота	T T T	T T T	T T T	T T T	T T T
		Направление ветра	F	F	F	F	F
		Скорость ветра	NA	NA	NA	NA	NA
23472	Туруханск	Температура воздуха	T T T	T T T	T T T	T T T	T T T
		Геопотенц. высота	T T T	T T T	T F T	T F T	T T T
		Направление ветра	F	T	T	T	T
		Скорость ветра	NA	F F	T T	F F	T T
24266	Верхоянск	Температура воздуха	T T T	T T T	T T T	T T T	T T T
		Геопотенц. высота	T T T	T T T	T T T	T T T	T T T
		Направление ветра	F	F	T	T	T
		Скорость ветра	NA	NA	F F	F F	F T

Таблица 3

**Количество ситуаций, когда отвергалась гипотеза
о равенстве математических ожиданий/дисперсий для температуры воздуха**

Уровень, гПа	Период осреднения							
	2017–2022 гг.	2021 г.	Зима	Весна	Лето	Осень	Май	Октябрь
850	3/0	0/1	3/1	1/0	3/2	3/2	0/0	1/0
700	2/0	0/0	1/0	0/0	1/0	0/0	0/0	0/0
500	0/0	0/0	1/1	0/0	1/0	0/0	0/0	0/0
400	0/0	0/0	1/2	0/0	1/1	0/0	0/1	0/0
300	1/3	0/0	1/3	1/3	4/4	2/3	0/5	0/3

Таблица 4

**Количество ситуаций, когда отвергалась гипотеза
о равенстве математических ожиданий/дисперсий для геопотенциальной высоты**

Уровень, гПа	Период осреднения							
	2017–2022 гг.	2021 г.	Зима	Весна	Лето	Осень	Май	Октябрь
850	3/1	0/0	2/0	1/3	0/0	1/1	0/0	0/0
700	4/1	0/0	2/0	2/0	0/0	2/0	0/0	0/0
500	3/0	0/0	1/0	1/1	1/0	0/0	0/0	0/0
400	4/0	0/0	3/0	3/0	1/0	0/0	0/0	0/0
300	0/0	0/0	0/0	1/0	1/0	0/0	0/0	0/0

Таблица 5

**Количество ситуаций, когда отвергалась гипотеза
о равенстве вероятностей попадания направления ветра в выбранные градации
и равенстве математических ожиданий скорости ветра в этих градациях**

Уровень, гПа	Период осреднения							
	2017–2022 гг.	2021 г.	Зима	Весна	Лето	Осень	Май	Октябрь
850	10	7	7	8	11	9	3	4
700	10	4	4	6	7	5	1	4
500	6	1	2	2	1	0	2	0
400	7	1	1	1	2	0	2	0
300	1	1	0	1	1	0	0	1

На основании результатов, приведенных в табл. 2–5, можно сделать следующие выводы.

1. Для температуры воздуха:

– гипотеза о равенстве математических ожиданий всегда принималась для всех уровней атмосферы при периодах осреднений «один год» и «один месяц»;

– для периодов осреднения «октябрь», «сезоны года» и «шесть лет» гипотеза о равенстве математических ожиданий отвергалась в зависимости от уровня в атмосфере в диапазоне от 1,7% случаев для периода осреднения «октябрь» до 11,7% случаев для периода осреднения «лето»;

– периодов осреднения, при которых гипотеза о равенстве дисперсий принималась во всех случаях не выявлено;

– в целом, ситуации, когда гипотеза о равенстве дисперсий не принималась, в зависимости от уровня в атмосфере принадлежат диапазону 1,7% случаев для периода осреднения «октябрь» до 16,7% случаев для периодов осреднения «зима» и «лето».

2. Для геопотенциальной высоты:

– гипотеза о равенстве математических ожиданий принималась для всех уровней в атмосфере для периодов осреднения «один год» и «один месяц»;

– для остальных периодов осреднения гипотеза о равенстве математических ожиданий отвергалась в зависимости от уровня в атмосфере в диапазоне от 5,0% случаев для периодов осреднения «осень» и «лето» до 23,3% случаев для периода осреднения «шесть лет»;

– гипотеза о равенстве дисперсий принималась для всех уровней в атмосфере для периодов осреднения «один год», «зима», «лето», «май» и «октябрь»;

– для остальных периодов осреднения гипотеза о равенстве математических ожиданий отвергалась в зависимости от уровня в атмосфере в диапазоне от 1,7% случаев для периода осреднения «осень» до 6,7% случаев для периода осреднения «весна».

3. Для направления и скорости ветра гипотезы о равенстве вероятности попадания направления ветра в выбранные градации и равенства математических ожиданий скорости ветра в каждой градации отвергались при всех периодах осреднения. Число случаев, когда указанные гипотезы отвергались принадлежат диапазону от 13,3% случаев для периода осреднения «май» до 56,7% случаев для периода осреднения «шесть лет».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенного исследования по статистической проверке гипотез о равенстве основных числовых характеристиках температуры воздуха, геопотенциальной высоты, направления и скорости ветра в свободной атмосфере по данным реанализа и радиозондовых наблюдений при различных периодах осреднения можно сделать итоговый вывод, что данные реанализа о направлении и скорости ветра в свободной атмосфере слабо согласуются с данными радиозондовых наблюдений. Использование данных реанализа вместо данных радиозондовых наблюдений при статистическом анализе нецелесообразно. Что касается температуры воздуха и геопотенциальной высоты изобарических поверхностей в свободной атмосфере, то использование данных реанализа вместо данных радиозондовых наблюдений возможно для периодов осреднения «один месяц» и «один год».

Список используемых источников

1. Лопатухин Л. И., Яицкая Н. А. Данные реанализа полей ветра над Каспийским морем для расчета режима ветрового волнения // Водные ресурсы. – 2019. – Т. 46, № 6. – С. 598–604.

2. Бокучава Д. Д., Семенов В. А. Анализ аномалий приземной температуры воздуха в Северном полушарии в течение XX века по данным наблюдений и реанализов // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2018. – № 1. – С. 28–51.

3. Лавров А. С., Хохлова А. В. Климатический мониторинг ветра в свободной атмосфере Северного полушария: многолетние характеристики и тенденции изменчивости // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2020. – Т. 2. – С. 58–75.

4. Шимарин А. В., Переведенцев Ю. П., Сабирова М. В. Особенности вертикального распределения температуры воздуха в тропосфере и нижней стратосфере // Вестник Удмуртского университета. – 2019. – Т. 29, вып. 2. – С. 258–266.

5. NOAA Physical Sciences Laboratory. NCEP/NCAR Reanalysis 1. – URL: <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html> (дата обращения: 18.02.2023).

6. Радиозондовые наблюдения (срочные данные) // Единый информационный фонд данных / ВНИИГМИ-МЦД. – URL: <http://meteo.ru/data/167-radiosonde-observations> (дата обращения: 18.02.2023).

7. Гандин Л. С., Каган Р. Л. Статистические методы интерпретации метеорологических данных. – Л. : Гидрометеиздат, 1976. – 360 с.

8. Орлов А. И. Прикладная статистика : учебник. – М. : Экзамен, 2006. – 671 с.

9. Прикладная статистика. Основы эконометрики : учебник для вузов : в 2 т. – 2-е изд., испр. – М. : ЮНИТИ-ДАНА, 2001. – Т. 1 : Теория вероятностей и прикладная статистика / С. А. Айвозян, В. С. Мхитарян. – 656 с.
10. Лемешко Б. Ю. Критерии проверки гипотез об однородности. Руководство по применению : моногр. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : ИНФРА-М, 2021. – 248 с.
11. Лемешко Б. Ю., Лемешко С. Б., Горбунова А. А. О применении и мощности критериев проверки однородности дисперсии. Ч. I : Параметрические критерии // Измерительная техника. – 2010. – № 3. – С. 10–16.
12. Robust Tests for Equality of Variances / *Levene H.* [et al.] // Contributions to Probability and Statistics. – Stanford University Press: Palo Alto. – 1960. – P. 278–292.
13. *Fox J., Weisberg S.* An R Companion to Applied Regression. – Third edition. – Sage : Thousand Oaks CA, 2019. – URL: <https://socialsciences.mcmaster.ca/jfox/Books/Companion/> (дата обращения: 27.06.2023).
14. Статистические методы обработки результатов наблюдений : учебник для вузов / Р. М. Юсупов [и др.]. – М. : МО СССР, 1984. – 563 с.
15. *Кобзарь А. И.* Прикладная математическая статистика : для инженеров и научных работников. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с.
16. Data Learning. Математическая статистика. Проверка статистических гипотез. Проверка гипотез о вероятности «успеха» в схеме Бернулли. – URL: <https://datalearning.ru/index.php/textbook?cid=1&mid=3&topic=3> (дата обращения: 27.06.2023).
17. RStudio: Integrated development environment for R (Version 1.1.453). – Boston : MA, 2023. – URL: <http://www.rstudio.org/> (дата обращения: 27.06.2023).
18. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. – Vienna, Austria, 2018. – URL: <https://www.R-project.org/> (дата обращения: 27.06.2023).
19. *Wickham H, Bryan J.* Readxl: Read Excel Files. R package version 1.4.2. – 2023. – URL: <https://CRAN.R-project.org/package=readxl> (дата обращения: 27.06.2023).
20. *Pierce D.* Ncdf4: Interface to Unidata netCDF (Version 4 or Earlier) Format Data Files. R package version 1.21. – 2023. – URL: <https://CRAN.R-project.org/package=ncdf4> (дата обращения: 27.06.2023).

Д. Н. Бирюков*,
доктор технических наук, профессор;
С. Л. Лебедев**;
В. Ю. Руссу*

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

**Войсковая часть 35565, г. Москва.

ПОДХОД К АВТОМАТИЗАЦИИ ПОИСКА УЯЗВИМОСТЕЙ В ПРОШИВКАХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ

Рассмотрен подход к автоматизации поиска уязвимостей в программном обеспечении телекоммуникационного оборудования на основе методов машинного обучения. Произведены сбор тестовых программ для формирования обучающей выборки, их классификация, компиляция под архитектуры ARM и MIPS, преобразование в промежуточный байт код LLVM IR. Рассмотрен подход к формированию вектора признаков из LLVM IR с помощью модели Word2Vec для обучения нейронной сети LSTM.

Ключевые слова: защита информации, автоматизация поиска уязвимостей, автоматизация распаковки прошивки, информационная безопасность.

ВВЕДЕНИЕ

Различное телекоммуникационное оборудование (ТКО) широко применяется в повседневной жизни, используется как в системах государственного назначения, так и для обеспечения доступа частных пользователей к сети Интернет.

Функционирование ТКО обеспечивается за счет программного обеспечения (ПО), которое может содержать как элементы, реализующие недокументированные (недекларированные) возможности, так и элементы с ошибками. Как правило, ТКО анализируется методом «черного ящика», когда исследователю практически ничего не известно об объекте исследования. Это означает, что доступа к исходным кодам ПО нет, документация также отсутствует, и все, что есть в распоряжении исследователя, – руководство пользователя и аспекты работы устройства, полученные из открытых источников. По этой причине приходится прибегать к тестированию устройства методами «черного ящика», например путем фаззинга системных вызовов при эмуляции работы прошивки или посредством применения различных сканеров (nmap, openvas, netmiko и др.), что приводит к большой трате времени и низкой эффективности в связи с возможностью пропуска границ и переходов, которые не очевидны из спецификации, но есть в реализации кода.

Таким образом, необходимо создание инструмента для автоматизации поиска уязвимостей в ПО ТКО, что также обусловлено необходимостью повышения скорости и эффективности анализа безопасности телекоммуникационных устройств, используемых в государственных, военных и гражданских сетевых инфраструктурах.

Исследование [1] показало, что автоматизация поиска уязвимостей может быть достигнута методами глубокого обучения. VulnDeePecker [2] использует метод обнаружения, основанный на глубоком обучении нейронной сети LSTM на программных срезах для обнаружения двунаправленных функций API, вызывающих связанные уязвимости. Авторы [3] показали, как можно выполнить обнаружение на основе декомпилированного кода ASM. Подобно методам глубокого обучения, основанным на анализе исходного кода, преобразованный код обрабатывался рекуррентными нейронными сетями в соответствии с методами обработки естественного языка (NLP). Однако в работе учитывались только стековые пополнения буфера.

Методы поиска уязвимостей в исполняемых файлах с помощью методов машинного обучения можно использовать дополнительно к классическим методам статического анализа кода. Преимущество использования машинного обучения для статического анализа заключается в том, что набор правил для выявления уязвимостей задается не статически, а динамически создается на этапе обучения модели.

Таким образом, при постановке задачи проектирования перспективного средства автоматизации поиска уязвимостей в ПО ТКО следует решить следующие задачи:

- выбрать классификацию уязвимостей, которая будет учитывать наиболее распространенные, а впоследствии и все выявленные ранее ошибки, специфичные для исполняемых файлов;
- собрать тестовые программы с документированными недостатками под каждый класс уязвимостей и стандартизировать их для создания обучающей выборки;
- автоматизировать процесс извлечения исполняемых и служебных (бинарных, текстовых) файлов из файловых систем телекоммуникационного оборудования;
- автоматизировать процесс сбора информации о техническом состоянии телекоммуникационного оборудования путем ввода необходимых команд управления им и интерпретации результатов их выполнения.

Далее приводится описание подходов к решению вышеперечисленных задач.

ВЫБОР КЛАССИФИКАЦИИ УЯЗВИМОСТЕЙ

Существуют различные системы классификаций уязвимостей, начиная с общепринятых, заканчивая локальными классификациями отдельных компаний. Приведем семь наиболее популярных из них: OWASP Top 10, CVE, CWE, VulDB, CAPEC, NVD, ИСПДн. Они не подходят для классификации уязвимостей в исполняемых файлах по следующим причинам:

- 1) OWASP (<https://owasp.org/Top10/>) – делается основной акцент на web уязвимости и неправильную настройку конфигурационных файлов;
- 2) CVE (https://cve.mitre.org/cve/search_cve_list.html) – содержит практически все существующие уязвимости ПО и слишком их детализирует, что приводит к отсутствию единой структуры уязвимостей;
- 3) CWE (<https://cwe.mitre.org/data/definitions/1387.html>) – так как является базой данных угроз, то опирается в основном на ошибки в исходном коде;
- 4) NVD (<https://nvd.nist.gov/>) – то же самое что и с CVE;
- 5) ИСПДн – информация не всегда актуальна и то же самое что и с CVE.

Проанализировав указанные выше базы данных, их достоинства и недостатки можно сделать вывод, что необходимо составить собственную классификацию уязвимостей исполняемых файлов для удобства решения задачи кластеризации. Необходимо из вышеприведенных баз данных (БД) выбрать те уязвимости, которые будут относиться к исполняемым файлам.

Предлагается следующая классификация уязвимостей:

- 1) buf – переполнение буфера (Buffer overflow) – CWE-119, CWE-120;
- 2) crypt – криптографическая ошибка (плохой дизайн или реализация), включая хранение/передачу конфиденциальной информации открытым текстом – CWE-325, CWE-320, CWE-311, CWE-347, CWE-310;
- 3) design – проблема проектирования, как правило, в протоколах или языках программирования;
- 4) dos-flood – отправка сверхбольшого количества запросов в программу с целью довести ее до отказа за счет исчерпания вычислительных ресурсов – CWE-400;
- 5) dos-malform – отправка некорректных запросов в программу с целью вызова в ней ошибки в обработке запроса – CWE-404;

6) eval-inject – неправильная нейтрализация встроенных скриптов из входных данных, полученных от вышестоящего компонента ПО – CWE-95;

7) form-field – отсутствие проверки CGI программы полей формы, которые не должны изменяться – CWE-472;

8) format-string – уязвимость строки формата, пользователь может вводить спецификаторы формата во время обработки строки – CWE-134;

9) int-overflow – числовое значение может быть увеличено до точки, где оно переполняется и начинается с минимального значения с последствиями для безопасности – CWE-190;

10) memleak – утечка памяти (не освобождается память, когда нужно) – CWE-401;

11) metachar – неэкранированные метасимволы оболочки или другие «специальные» символы без кавычек, в настоящее время включает внедрение SQL, но не XSS – CWE-78;

12) perm – назначает неправильные разрешения, неправильно рассчитывает разрешения или неправильно проверяет разрешения – CWE-276;

13) race – состояние гонки процессов и потоков, которые могут привести к некорректной работе программы – CWE-366, CWE-362, CWE-364, CWE-368, CWE-363, CWE-367, CWE-370, CWE-421;

14) rand – использование «угадываемых» источников при генерации случайных чисел – CWE-332, CWE-342, CWE-330, CWE-339, CWE-331, CWE-341, CWE-338;

15) relpath – уязвимость использования открытых путей поиска, которая может привести к угрозам атак типа «троянский конь», например переменная среды PATH в Linux – CWE-114, CWE-428, CWE-426;

16) signedness – ошибка подписи, когда числовое значение в одном формате/представлении неправильно обрабатывается. Перекрывает целочисленные переполнения и ошибки индекса массива – CWE-195, CWE-196;

17) type-check – программа неправильно определяет тип входного параметра или файла, затем отправляет неверный «исполняемый файл» (возможно, самого себя) для обработки ввода или иным образом искажает ввод.

В результате проведенных исследований было собрано 48 593 тестовых примеров: buffer overflow – 22911, crypt – 3255, dos-flood – 86, dos malform – 90, form field – 903, format string – 7044, int overflow – 2290, perm – 106, race – 392, rand – 8217, relpath – 106, signedness – 1167, type check – 2026.

АЛГОРИТМ ПОДГОТОВКИ ДАННЫХ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ

Чтобы использовать машинное обучение для статического обнаружения уязвимостей, необходимо подготовить обучающую выборку, которая представляет собой псевдокоды уязвимых функций. Для этого удобно использовать набор примеров с сайта SARD [4] – в общей сложности 450 000 примеров уязвимых участков кода на языках C, C++, C#, JAVA, PHP, классифицированных по стандарту CWE. Дальнейшие этапы подготовки обучающей выборки представлены на рис. 1.



Рис. 1. Этапы подготовки обучающей выборки

1. Подготовка набора данных. Собранные тестовые программы компилируются с помощью make-файлов. Устанавливаются специальные параметры для компилятора, чтобы процесс компиляции проходил без оптимизации. Также необходимо учитывать под какую

архитектуру будет проходить компиляция. Чаще всего вендоры телекоммуникационного оборудования в своих устройствах используют следующие архитектуры: CISCO (MIPS, PowerPC), Huawei (ARM), D-link (MIPS, ARM), Eltex (ARM), TP-link (MIPS). Поэтому целесообразно компилировать под MIPS и ARM.

2. Декомпиляция. LLVM IR – это платформенно-независимый ассемблер, для промежуточного представления программ. Фреймворк LLVM предоставляет инструмент RetDec [5], который декомпилирует исполняемые файлы различных архитектур в LLVMIR (рис. 2).

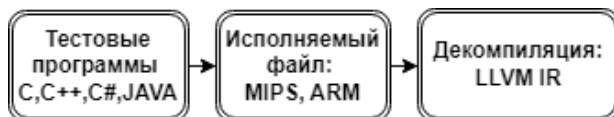


Рис. 2. Процесс компиляции и приведения к LLVM IR тестовых примеров

3. Предварительная обработка LLVM IR. Чтобы эффективно обучить нейронную сеть, необходимо привести LLVM IR псевдокод к стандартизованному виду (токенизация). Для этого необходимо реализовать собственный синтаксический анализатор, который будет выполнять пять шагов:

3.1) глобальные и локальные переменные приводятся к единому виду за счет замены каждого ключевого слова префиксом и счетчиком, например: LBL X, VAR X и т. д.;

3.2) нелокальные функции, например стандартные функции C, такие как memcpy, strcpy, остаются в искомом виде, а локальные функции дополняются постфиксом «-hex»;

3.3) все числа приводятся к общему виду за счет разделения каждого числового значения на отдельные цифры, которые рассматриваются как отдельные токены;

3.4) в конце каждой строки добавляется маркер «-EOL-»;

3.5) полученный код упаковывается в токены, которые представлены одним массивом данных для каждой обрабатываемой функции.

4. Выбор тестового примера. Часть полученных токенов отбрасывается по следующим критериям:

4.1) исключаются все токены, количество которых получается меньше, чем по 300 штук на один класс;

4.2) учитываются только те уязвимости, которые также присутствуют после компиляции (например, CWE, такие как CWE 615).

5. Кодирование набора в Word2Vec формат. Word2Vec – модель нейронной сети, предназначенная для векторного представления слов на естественном языке. С помощью нее происходит анализ семантики естественных языков (рис. 3) на основе дистрибутивной семантики и векторного представления слов [6].

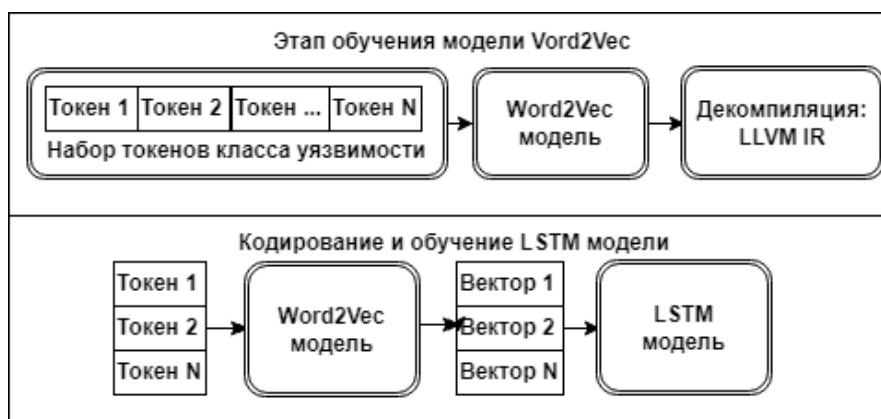


Рис. 3. Преобразование тестового набора в набор признаков Word2Vec

Чтобы подготовить набор токенов для обучения нейронной сети LSTM, нужно обучить Word2Vec-модель на созданном наборе данных с помощью библиотеки `python.gensim`. В ходе эксперимента модель была обучена с тремя параметрами, к которым относятся: 100 измерений, размер контекста 3, частота субдискретизации $1e-3$. Далее все образцы с помощью обученной модели токен за токеном преобразуются в векторный формат и передаются для обучения нейронной сети LSTM.

АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСПАКОВКИ ПРОШИВОК

Создание универсального распаковщика является давно исследуемой проблемой [7]. Выделим основные проблемы при распаковке программного обеспечения:

1) пользовательские форматы файлов. ПО ТКО, как правило, поставляется в виде одного файла, что упрощает установку. В настоящее время единого формата обновления ПО не существует. Каждый вендор создает свой собственный формат;

2) сжатие и шифрование. Для экономии места на диске ТКО ПО может храниться в сжатом виде. Для этого используются стандартные алгоритмы сжатия, такие как `gzip` и `lzma`. Однако в ряде случаев эти алгоритмы были изменены таким образом, чтобы они были несовместимы со стандартными инструментами распаковки. Шифрование и цифровые подписи также широко используются поставщиками для обеспечения целостности и защищенности. Для шифрования могут быть использованы различные алгоритмы, например, AES.

Существуют средства для автоматизации распаковки ПО, такие как `Binwalk`, `Firmware Mod Kit (FMK)`, `Binary Analysis Tools (BAT)`. Их работа основана либо на анализе заголовков сжатых разделов, либо на энтропийном анализе файла (рис. 4). Для указанных проектов с открытым исходным кодом периодически выходят обновления, поэтому их можно взять за основу для распаковки ПО и для дальнейшего анализа.

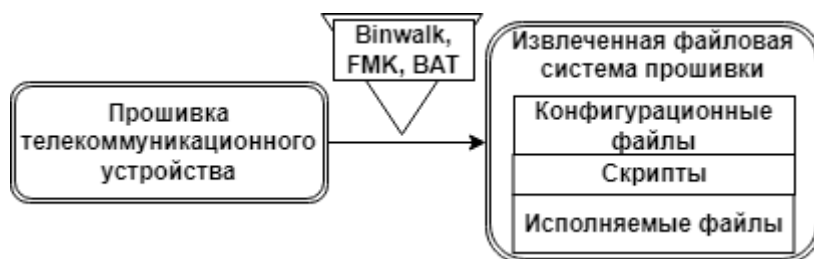


Рис. 4. Автоматизация извлечения файловой системы прошивки

Данным методом были извлечены файловые системы из ПО ТКО следующих моделей: D-Link dir-300, TP-LinkDeco x60, Eltex ESR-3200. Получены исполняемые файлы серверов:

– SSH DropbearServer 0.52 (D-Link dir-300), который подвержен уязвимости CVE-2019-12953;

– HTTPD Server 2.3.0-beta2 (TP-LinkDeco x60), содержащий уязвимость CVE-2023-30847;

– FTP Server 9.0.7.1 (Eltex ESR-3200) с уязвимостью CVE-2022-39187.

Перечисленные файлы программного обеспечения будут использоваться для проверки работоспособности LSTM-модели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный подход к автоматизации поиска уязвимостей в ПО ТКО позволил сформировать обучающую выборку для обучения LSTM-модели. В дальнейшем планируется определить эффективность использования предложенного подхода для достаточной

идентификации уязвимостей в двоичных исполняемых файлах программного обеспечения телекоммуникационного оборудования, а также в служебных (текстовых файлах настроек). В случае успеха можно будет рекомендовать общий подход к анализу и констатировать, что методы глубокого обучения способны выявлять множество практически значимых уязвимостей.

Список используемых источников

1. Recurrentneural network based binary code vulnerability detection / J. Zheng [et al.] // 2nd International Conference on Algorithms, Computing and Artificial Intelligence. – Sanya, China: Association for Computing Machinery, 2019. – P. 160–165.
2. VulDeePecker: A Deep Learning-Based System for Vulnerability Detection / Z. Li [et al.]. – URL: https://www.ndss-symposium.org/wp-content/uploads/2018/02/ndss2018_03A-2_Li_paper.pdf (дата обращения: 07.07.2023).
3. Optimizing seed inputs in fuzzingwith machine learning / L. Cheng [et al.] // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 36340–36352.
4. *Paul E. Black*. SARD: Thousands of Reference Programs for Software Assurance. – URL: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=923127 (дата обращения: 07.07.2023).
5. *J. Kroustek, P. Matula, P. Zemek*, RetDec: An Open-Source Machine-Code Decompiler. – URL: <https://www.botconf.eu/botconf-presentation-or-article/retdec-an-open-source-machine-code-decompiler/> (дата обращения: 07.07.2023).
6. *T. Mikolov, K. Chen, G. Corrado, J. Dean* Efficient Estimation of Word Representations in Vector Space. – URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1301/3781> (дата обращения: 07.07.2023).
7. Анализ методов выявления уязвимостей во встроенном программном обеспечении ИОТ устройств / Д. Тавасиев [и др.] // Международный научно-исследовательский журнал. – 2020. – № 1(91). – С. 34.

А. Г. Ломако,
доктор технических наук, профессор;
А. Б. Менисов,
кандидат технических наук;
П. В. Тимашов,
кандидат технических наук

ВЫЯВЛЕНИЕ УТЕЧКИ НАБОРОВ ДАННЫХ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВЫХ ВОДЯНЫХ ЗНАКОВ

Огромный объем обучающих данных и доступные вычислительные возможности стали ключевым фактором успеха технологий искусственного интеллекта, основным компонентом которых является машинное (глубокое) обучение. Для компонентов машинного и глубокого обучения остро стоит проблема обеспечения конфиденциальности наборов данных от утечки и дальнейшего несанкционированного использования. В статье представлен подход применения цифровых водяных знаков на основе бэkdора для обеспечения защиты наборов данных. Вставляя небольшое количество образцов с цифровыми водяными знаками в набор данных, можно идентифицировать сторонние модели машинного обучения, незаконно обученные на наборе данных. Проведенные эксперименты с графическими и текстовыми наборами данных демонстрируют, что разработанный подход маркирует наборы данных с минимальным влиянием на исходную производительность моделей машинного обучения, позволяя гарантированно определять факт применения таких данных.

Ключевые слова: утечка информации; конфиденциальность; набор данных; модели машинного обучения; вставка бэkdора; водяной знак; защита систем искусственного интеллекта.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широко используются информационные системы, в основу которых входят модели машинного обучения, обрабатывающие большие объемы данных [1]. Быстрому развитию моделей машинного обучения в значительной степени способствовали высококачественные наборы данных, на основе которых исследователи и разработчики могут оценивать и улучшать свои алгоритмы обучения. Поскольку подготовка наборов данных, включающая сбор, маркировку и очистку данных, является трудоемким и дорогостоящим процессом, может содержать конфиденциальную информацию, то проблема защиты наборов данных имеет большое значение.

Предотвращение утечек наборов данных является актуальной областью исследований, касающихся многих аспектов безопасности информации. На сегодняшний день широко распространены способы анонимизации [2], шифрования [3], обеспечения дифференциальной приватности [4] и применения цифровых водяных знаков [5] для защиты данных.

Шифрование является классическим методом защиты информации, при котором только пользователи, получившие секретный ключ, могут расшифровать часть или все данные. В настоящее время в области машинного обучения существуют некоторые эмпирические методы [6], которые защищают конфиденциальные наборы данных. Дифференциальная приватность заключается в формировании статистических характеристик набора данных и позволяет открыто обмениваться наборами данных. Анонимизация генерирует уменьшенную или видоизмененную версию данных, которая обеспечивает гарантии того, что записи не могут быть идентифицированы без ущерба для другой ценной информации.

Однако эти методы не в полной мере подходят для защиты наборов данных. В частности, анонимизация, шифрование и дифференциальная приватность будут препятствовать нормальному функционированию моделей машинного обучения – влиять на качество результа-

тов моделей машинного обучения, в то время как цифровые водяные знаки (далее – водяные знаки) будут иметь незначительные последствия.

Сейчас водяные знаки используются для более широкого спектра приложений, даже для обнаружения DeepFake [7]. Перспективным подходом к защите наборов данных является масштабирование технологии водяных знаков [8] для проверки факта обучения сторонней модели машинного обучения на определенном (скомпрометированном) наборе данных. В частности, проверка сторонней модели машинного обучения должна выполняться в условиях «черного ящика», поскольку часто есть возможность получать только выходные данные с модели, не имея информации о ее параметрах и деталях обучения. Эти условия более жестки, так как необходимо выполнять проверку утечки наборов данных, даже если есть доступ только к API-модели.

Таким образом, для решения задачи выявления утечки наборов данных машинного обучения лучшим способом является применение бэкдоров для нанесения водяных знаков, потому что они могут вызывать определенное функционирование моделей машинного обучения через входные данные с триггерами [9], при этом сохраняя высокое качество на безопасных образцах. Для выявления утечки набора данных необходимо идентифицировать, была ли сторонняя модель обучена на скомпрометированном наборе данных с водяными знаками, проверив наличие определенного бэкдора.

СПОСОБЫ ДОБАВЛЕНИЯ БЭКДОРОВ В НАБОРЫ ДАННЫХ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Современные модели машинного обучения имеют сложную архитектуру (например, ChatGPT и DALL-E), требуют большого объема данных и времени для обучения (недели или даже месяцы). Необходимая для обучения моделей инфраструктура стоит дорого и доступна не всем, и многие организации вынуждены передавать реализацию своих моделей третьим сторонам или создавать свои модели путем переобучения предварительно обученных моделей. Такой аутсорсинг содержит риски безопасности и определяет новую модель угроз. В этой форме взаимодействия злоумышленник, участвующий в разработке модели обучения, потенциально скрывает вредоносную функциональность, которая может быть запущена при вводе в систему специально модифицированных входных данных. Стоит отметить, что исходная функциональность моделей машинного обучения остается неизменной для обычных входных данных. Эта угроза уже широко была исследована во многих проектах [10] под названием троян или бэкдор и актуальна для больших наборов данных, а также для наборов данных, собранных из ненадежных источников сети Интернет. Также существует угроза внедрения закладки в уже эксплуатируемую модель машинного обучения.

По сравнению с состязательными атаками (использование незаметных модификаций входных данных) бэкдор целенаправленно манипулирует выходными данными модели и является более опасным, поскольку обеспечивает гибкость и универсальность – один и тот же (настраиваемый) триггер может использоваться для атаки на любую модель машинного обучения.

Бэкдор отличается от состязательных атак следующими особенностями:

- происходит манипулирование выводом модели машинного обучения, а не добавления шума к входным данным;
- нарушение функционирования неактивно до момента срабатывания триггера, что делает эти атаки более скрытными;
- триггеры не зависят от набора данных, а дизайн триггера очень гибок и изменяем.

Первым широко известным прецедентом проведения бэкдора является нейронная сеть BadNets [11], и с момента реализации (2017 г., Университет Нью-Йорка) были предложены

несколько типов модификаций. Большинство последующих типов бэкдора увеличили его скрытность за счет уменьшения размеров триггеров и изменения вектора воздействия.

Определенное свойство данных называется триггером, поскольку оно запускает скрытую функциональность. Это свойство может быть небольшим набором пикселей определенной формы и цвета для изображений или редким словом, фразой в тексте. Формально бэкдор опишем как отображение

$$f(x, t_i, \kappa) = x^{bd}, \quad (1)$$

где x – входной вектор;
 $t_i \in T$ – триггер;
 $\kappa \in K$ – желаемое место для добавления триггера;
 x^{bd} – входной вектор x с триггером, вставленным в точку κ .

Обычно (как в случае с BadNets) злоумышленник для проведения бэкдор участвует в обучении модели с закладкой a^{bd} , которая ведет себя иначе, чем безопасно обученная модель a . Успешный бэкдор должен выполнять следующие две задачи:

1) качество функционирования модели с закладкой a^{bd} должно быть больше или равно качеству функционирования модели a , чтобы закладка оставалась незаметной и скрытой:

$$Q(a^{bd}, d_{valid}) \geq Q(a, d_{valid}), \quad (2)$$

где d_{valid} – валидационный набор данных;

2) входные данные в модели с закладкой a^{bd} с определенным триггером следует классифицировать иначе, чем чистая модель a . То есть, имеется бинарная функция $f: \mathbb{R}^N \rightarrow \{0, 1\}$, которая возвращает истинное значение 1, когда на входе присутствует конкретный признак, и ложное 0 – в противном случае. Цель бэкдор может быть выражена следующим образом:

$$f(x) = 1, \arg \max a^{bd}(x) \neq \arg \max a(x), \quad (3)$$

т. е. при входных данных x модель возвращает класс конкретных входных данных для задачи классификации.

Ожидается, что модель с бэкдором a^{bd} содержит отображение векторов признаков с триггерами на их соответствующую целевую метку класса, т. е. любые данные с триггером t_i должны иметь метку класса c_i на выходе модели машинного обучения. Для обучения такой модели злоумышленнику нужны как набор данных без триггеров d_{train} (для сохранения полезности модели), так и d_{train}^{bd} с триггерами (для реализации бэкдор).

Верхняя типизация такого типа воздействия включает как целевой бэкдор, так и нецелевой. При нецелевом бэкдоре действия злоумышленника заключаются в том, чтобы классифицировать входные данные как любой неправильный класс, что аналогично атаке типа «отказ в обслуживании». Целевой бэкдор связывает «зараженные» входные данные с определенным классом, целевым классом. Эти бэкдоры представляют серьезную угрозу, поскольку их можно использовать для обхода критичных к безопасности систем, таких как система аутентификации с распознаванием лиц. В таком случае злоумышленник может связать инициированный ввод с ключевой фигурой, такой как генеральный директор компании, и получить несанкционированный доступ.

В области применения бэкдоров как водяных знаков для защиты от утечек наборов данных определим следующие требования.

Требование 1. Водяные знаки на основе бэкдора должны сохранять пригодность набора данных, т. е. производительность моделей, обученных на наборе данных с водяными знака-

ми, должна быть схожа с производительностью моделей, обученных на базовом наборе данных.

Требование 2. Модель, обученная на скомпрометированном наборе данных, будет иметь определенный триггер, используемый в качестве водяного знака, для выявления того, использовался ли набор данных для обучения сторонней модели.

Требование 3. Процесс внедрения водяных знаков должен оставаться незаметным для злоумышленников. Другими словами, водяные знаки должны быть достаточно скрытными, чтобы избежать методов обнаружения бэкдора.

В целом методы ухода от проверки водяных знаков можно разделить на две основные категории: эмпирические и сертифицированные. Эмпирические средства [9, 12, 13] разрабатываются на основе наблюдений или понимания существующих бэкдоров и имеют определенную эффективность на практике, однако нет гарантии, что будут выявлять некоторые адаптивные бэкдоры. Напротив, результативность сертифицированных средств [14–16] теоретически гарантируется при определенных ограничениях. Учитывая быстрое развитие бэкдоров, стоит отметить несовершенство существующих подходов ухода от выявления водяных знаков на основе бэкдора.

ПОДХОД К ВЫЯВЛЕНИЮ УТЕЧКИ НАБОРОВ ДАННЫХ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВЫХ ВОДЯНЫХ ЗНАКОВ

Предлагаемая структура подхода включает два этапа: добавление водяных знаков на основе бэкдора в набор данных и проверку обученных моделей на наличие таких данных.

Для формализации задачи добавления водяных знаков в наборы данных возьмем задачи классификации изображений и рубрикации текстов.

Пусть решения прикладных задач (классификация и рубрикация) в обычных условиях происходит как $a: X \rightarrow Y$, где $\{y_1, \dots, y_i\} \subset Y$ – пространство классов (рубрик), $\{x_1, \dots, x_j\} \subset X$ – пространство признаков. Для обучения модели машинного обучения применяют набор данных $d_{train} = \{(x_j, y_i)\}_1^N$, где N – мощность выборки. Далее генерируются модифицированные данные $d_{train}^{bd} = \{(x_j^{bd}, y) \mid j \in J^{bd}\}$, где x_j^{bd} – сгенерированные данные из нормальных признаков x_j и содержащие триггер; y – целевой класс (рубрика) и J^{bd} – набор индексов модифицированных данных.

Добавление водяных знаков в наборы данных формулируется как многоцелевая оптимизационная задача:

$$\min L(d_{train}, d_{train}^{bd}, a^{bd}) = \sum_{x_j \in d_{train}} l(a^{bd}(x_j), y_i) + \sum_{x_j^{bd} \in d_{train}^{bd}} l(a^{bd}(x_j^{bd}), y), \quad (4)$$

где L – функция потерь классификации изображений (рубрикации текстов).

При этом первая цель заключается в минимизации функции потери на данных без водяных знаков, чтобы сохранить ожидаемую функциональность модели машинного обучения. Вторая цель представляет ожидаемый результат, максимизируя вероятность успеха выявления скомпрометированных данных.

Этап 1. Добавление водяных знаков в наборы данных.

Добавление водяных знаков в наборы данных проводится статично или динамически. Статичное добавление проводится с фиксированными шаблонами триггеров и их местоположениями. В динамическом варианте триггеры с разными значениями (шаблонами) могут размещаться на разных позициях входных данных (местоположении):

$$a^{bd}(x, t_i, \kappa) = t_i \kappa + x(1 - \kappa), \quad (5)$$

где x – входной вектор;

$t_i \in T$ – триггер;

κ – бинарная маска с единицами в указанном месте триггера.

По сравнению со статичным динамическое добавление водяных знаков вводит новые функции для триггеров, которые дают больше гибкости и усложняют обнаружение таких закладок.

Таким образом, чтобы добавить водяные знаки, необходимо сначала предварительно создать набор триггеров T и набор возможных местоположений K :

1) вместо того, чтобы использовать фиксированный триггер для всех данных, каждый раз выбирается новый триггер из равномерного распределения, т. е. $t_i \sim U[0, J^{bd}]$. Поскольку триггер выбирается случайным образом из равномерного распределения, то существует большой диапазон возможных триггеров T ;

2) вместо размещения триггера в фиксированном месте, размещают его в случайном месте κ , выбранном из предопределенного набора местоположений $\kappa \in K$.

Этот подход не ограничен только равномерным распределением, можно использовать различные законы распределения для расположения триггеров.

Вышеописанную реализацию можно применить к любому множеству классов (рубрик) данных. Для любого класса $c_i \in C$ существует триггер t_i , который при добавлении к данным x в местоположении K заставит модель a^{bd} выдать c_i :

$$\forall c_i \in C \exists t, \kappa : a^{bd}(f(x, t, \kappa)) = c_i, \quad (6)$$

$$\forall c_i \in C \exists T', K',$$

где $T' (T' \subset T)$ – подмножество возможных триггеров

$K' (K' \subset K)$ – подмножество возможных местоположений для целевого класса c_i .

Можно построить непересекающиеся множества возможных местоположений следующим образом:

1) выбираются все возможные триггерные формы и формируется множество K ;

2) для каждого целевого класса c_i определяется набор возможных местоположений K' .

Затем удаляются выбранные местоположения из набора K . Можно создавать наборы местоположений произвольно, с единственным ограничением: ни одно местоположение не может использоваться более чем для одного целевого класса.

Этап 2. Проверка обученных моделей на наличие бэкдора водяных знаков.

Имея подозрительную стороннюю модель a^* , есть возможность проверить, была ли она обучена на наборе данных с водяными знаками. В условиях «черного ящика» есть возможность получения только выходных данных – значений целевого класса (рубрики). В частности, если x_j^{bd} обозначает данные с триггером, а c_i обозначает целевой класс (рубрику), то можно проверить подозрительную модель по результату $a^*(x_j^{bd}, t_i)$. Если $a^*(x_j^{bd}, t_i) = c_i$, подозрительная модель считается обученной на наборе данных с водяными знаками.

Для проверки m образцов данных, содержащих водяные знаки на основе бэкдора, предлагается использовать непараметрический статистический U-критерий Манна – Уитни – математическое правило, состоящее из следующих шагов.

Шаг 1. Формирование статистических гипотез.

Нулевая гипотеза (H_0) состоит в том, что для обучения модели a^* использовались данные с водяными знаками d_{train}^{bd} .

Альтернативная гипотеза (H_1) заключается в том, что при обучении модели a^* использовался другой (нескомпрометированный) набор данных d_{train} .

Шаг 2. Вычисление суммарных рангов m образцов данных с водяными знаками и n образцов без водяных знаков:

$$R^{bd} = \sum_{i=1}^m r(d_{train}^{bd}), \quad (7)$$

$$R^* = \sum_{i=1}^n r(d_{train}). \quad (8)$$

Шаг 3. Вычисление U-статистики Манна – Уитни:

$$U^{bd} = mn + \frac{1}{2}m(m+1) - R^{bd}, \quad (9)$$

$$U^* = mn + \frac{1}{2}n(n+1) - R^*, \quad (10)$$

$$U = \min\{U^*, U^{bd}\}. \quad (11)$$

Шаг 4. Сравнение U^* и U^{bd} при выбранном пороге значимости (p -значение = 0,05). Если U^* меньше или равно порогу значимости (p -значение $\leq 0,05$), то принимается нулевая гипотеза, следовательно, для обучения модели a^* использовались данные с водяными знаками d_{train}^{bd} . Если U^* больше, то заимствования выявлено не было.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ ВЫЯВЛЕНИЯ ПРИЗНАКОВ УТЕЧКИ НАБОРОВ ДАННЫХ

Замысел эксперимента

Проведение экспериментальных исследований разработанного подхода направлено на подтверждение следующих результатов:

1) добавление водяных знаков на основе бэкдоров в наборы данных, включая текстовые и графические данные, не влияет на качество функционирования моделей машинного обучения;

2) существует возможность выявления моделей машинного обучения, обученных на наборах данных с водяными знаками на основе бэкдоров.

Для проверки результатов введем следующие метрики.

Снижение качества функционирования модели машинного обучения. Чтобы оценить влияние водяных знаков на основе бэкдоров необходимо сравнить уровни качества модели, обученной на базовом наборе данных и наборе данных с водяными знаками.

Результативность бэкдора. Вероятность неправильной классификации входных данных с триггером для модели с бэкдором.

Обнаружение водяных знаков. Вероятность успешного обнаружения бэкдоров в моделях обучения.

Исходные данные

Для проведения эксперимента были выбраны наборы данных и модели машинного обучения, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Наборы данных и модели машинного обучения

Набор данных	Тип данных	Задача	Наименование	Качество
Stanford Cars	Изображения	Классификация изображений	TResNet-L-V2	Точность = 0,963
			ResMLP	Точность = 0,895
IMDB	Текст	Рубрикация	BERT	Точность = 0,908
			RoBERTa	Точность = 0,945

Набор данных Stanford Cars [17] состоит из 16 185 изображений (разрешением 340×240) для 196 классов автомобилей (марка и модель).

Набор данных IMDB [18] представляет собой текстовые данные, содержащие 50 000 обзоров фильмов, для бинарной рубрикации, язык – английский.

TResNet-L-V2 [19] – искусственная нейронная сеть в области компьютерного зрения, основанная на архитектуре ResNet50 [20], со специальными модификациями: снижением дискретизации, адаптивной пакетной нормализацией, улучшенным процессом субдискретизации, сглаживания и др.

ResMLP [21] – искусственная нейронная сеть в области компьютерного зрения, основанная на архитектуре многослойного перцептрона.

BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers) [22] – лингвистическая модель, основанная на архитектуре трансформера.


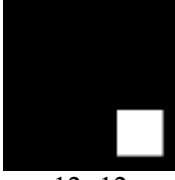


RoBERTa [23] – является расширением BERT с изменениями в процедуре предварительной обработки (увеличение объемов и усложнение обучающих данных).

Генерация и вставка водяных знаков на основе бэкдора

Для генерации и вставки бэкдоров были сформированы шаблоны триггеров, представленные в табл. 2.

Таблица 2

Триггеры, сформированные для эксперимента

Набор данных	Шаблоны триггеров	Прикладная задача			
		Классификация изображений		Рубрикация текстов	
Триггеры→		Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
Stanford Cars	Триггер 1	 4×4	 12×12	–	–
		 4×4	 12×12	–	–

Окончание табл. 2

Набор данных	Шаблоны триггеров	Прикладная задача			
		Классификация изображений		Рубрикация текстов	
Триггеры→		Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
IMDB	Триггер 3 (уровень слов)	–	–	"He "	["He ", "she ", 'sunny ']
	Триггер 4 (уровень предложений)	–	–	"He is a strong actor "	["He is a strong actor ", "I must say, "]

Для оценивания результативности водяных знаков определим следующие доли модифицированных данных: 1%, 5%, 10% и 20% от базового набора данных. Важно отметить, что эти доли данных с водяными знаками выбраны для целевого класса (рубрики) c_i :

- для набора данных – Bentley Arnage Sedan 2009;
- для набора данных IMDB – негативные отзывы.

После процесса дообучения [24] на данных с водяными знаками с помощью алгоритма кроссвалидации [25] было оценено качество моделей машинного обучения. Полученные результаты оценивания точности дообученных моделей машинного обучения на данных с водяными знаками представлены в табл. 3.

Таблица 3

Качество моделей машинного обучения

Модели машинного обучения→			TResNet-L-V2	ResMLP	BERT	RoBERTa
Исходная точность ¹ →			0,941	0,884	0,897	0,903
Шаблон триггера	Результативность бэкдора	Доля водяных знаков (%)	Точность с водяными знаками			
Триггер 1 Вариант 1	0,943	1%	0,928	0,871	–	–
		5%	0,865	0,807	–	–
		10%	0,738	0,678	–	–
		20%	0,484	0,420	–	–
Триггер 1 Вариант 2	0,962	1%	0,916	0,859	–	–
		5%	0,803	0,746	–	–
		10%	0,615	0,557	–	–
		20%	0,238	0,178	–	–
Триггер 2 Вариант 1	0,952	1%	0,927	0,870	–	–
		5%	0,859	0,801	–	–
		10%	0,722	0,662	–	–
		20%	0,448	0,384	–	–

¹ Исходная точность, полученная от моделей машинного обучения на следующей программно-аппаратной платформе: Intel Core i7 9750H 2.6 ГГц, 16 ГБ, nVidia GeForce GTX 1660 Ti MAX Q – 6144 Мб.

Окончание табл. 3

Модели машинного обучения→			TResNet-L-V2	ResMLP	BERT	RoBERTa
Исходная точность→			0,941	0,884	0,897	0,903
Шаблон триггера	Результативность бэкдора	Доля водяных знаков (%)	Точность с водяными знаками			
Триггер 2 Вариант 2	0,991	1%	0,912	0,855	–	–
		5%	0,769	0,712	–	–
		10%	0,482	0,426	–	–
		20%	0,028	0,014	–	–
Триггер 3 Вариант 1	0,871	1%	–	–	0,886	0,892
		5%	–	–	0,829	0,839
		10%	–	–	0,715	0,733
		20%	–	–	0,487	0,521
Триггер 3 Вариант 2	0,924	1%	–	–	0,885	0,893
		5%	–	–	0,827	0,840
		10%	–	–	0,710	0,735
		20%	–	–	0,476	0,525
Триггер 4 Вариант 1	0,897	1%	–	–	0,879	0,888
		5%	–	–	0,791	0,815
		10%	–	–	0,615	0,669
		20%	–	–	0,263	0,377
Триггер 4 Вариант 2	0,938	1%	–	–	0,877	0,887
		5%	–	–	0,779	0,809
		10%	–	–	0,583	0,653
		20%	–	–	0,191	0,341

Как показано в табл. 3, добавление 1% водяных знаков в наборы данных практически не снижает точность (< 4%) классификации (рубрикация). Кроме того, небольшое снижение точности, связанное с низким уровнем добавления водяных знаков, также обеспечивает скрытность водяных знаков. При этом показатель результативности водяных знаков не меньше значения 0,87 во всех случаях.

Для подтверждения возможности выявления моделей машинного обучения, обученных на наборах данных с водяными знаками (1%) на основе бэкдоров, случайным образом отбираем $m = 30$ различных тестовых образцов, содержащих водяные знаки, и $n = 30$ – из базового набора данных. Результаты идентификации моделей машинного обучения, обученных на водяных знаках представлены в табл. 4.

Так как во всех моделях, обученных на данных с водяными знаками, p -значение меньше порогового значения, то можно считать, что разработанный подход позволяет идентифицировать утечку набора данных с высокой степенью достоверности.

Таблица 4

Результаты выявления использования данных с водяными знаками

Модели машинного обучения	p -значение в моделях без водяных знаков	Шаблоны триггеров	p -значение в моделях с водяными знаками			
			Классификация изображений		Рубрикация текстов	
			Триггеры→	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
TResNet-L-V2	0,947	Триггер 1	2,296E-08	8,031E-09	–	–
		Триггер 2	7,977E-09	5,626E-10	–	–
ResMLP	0,877	Триггер 1	2,991E-08	8,006E-09	–	–
		Триггер 2	7,991E-09	5,649E-10	–	–
BERT	0,722	Триггер 3	–	–	4,294E-03	3,338E-04
		Триггер 4	–	–	4,675E-05	1,584E-05
RoBERTa	0,764	Триггер 3	–	–	8,192E-04	1,288E-04
		Триггер 4	–	–	4,966E-06	1,426E-06

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный подход, основанный на технологии цифровых водяных знаков, направлен на определение факта утечки и детектирование сторонних моделей, обученных на защищенном наборе данных. В частности, в набор данных включается небольшое количество образцов с водяными знаками на основе бэкдора, сохраняя при этом производительность для исходных прикладных задач. Эксперименты, проведенные с графическими и текстовыми наборами данных, показывают практическую значимость подхода для удовлетворения растущей потребности в обеспечении конфиденциальности наборов данных машинного обучения и защиты систем искусственного интеллекта для обеспечения требуемой работоспособности.

Список используемых источников

1. Индекс 2022 года : аналитический сборник № 12 / МФТИ // Искусственный интеллект : альманах. – Июль 2023. – URL: https://aireport.ru/ai_index_russia-2022 (дата обращения: 11.06.2023).
2. K-Anonymity Privacy Protection Algorithm for Multi-Dimensional Data against Skewness and Similarity Attacks / B. Su [et al.] // Sensors. – 2023. – Vol. 23. № 3. – P. 1554.
3. Encryption and Generation of Images for Privacy-Preserving Machine Learning in Smart Manufacturing / V. Terziyan [et al.] // Procedia Computer Science. – 2023. – Vol. 217. – P. 91–101.
4. Federated multi-source domain adversarial adaptation framework for machinery fault diagnosis with data privacy / K. Zhao [et al.] // Reliability Engineering & System Safety. – 2023. – Vol. 236. – P. 109246.
5. A zero-watermarking scheme based on spatial topological relations for vector dataset / N. Ren [et al.] // Expert Systems with Applications. – 2023. – Vol. 226. – P. 120217.
6. Evaluation of Privacy-Preserving Techniques: Bouncy Castle Encryption and Machine Learning Algorithms for Secure Classification of Sensitive Data / D. V. Tungar, D. V. Patil // International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering. – 2023. – Vol. 11, № 7s. – P. 429–440.

7. Faketagger: Robust safeguards against deepfake dissemination via provenance tracking / R. Wang [et al.] // Proceedings of the 29th ACM International Conference on Multimedia. – 2021. – P. 3546–3555.
8. Was my model stolen? Feature sharing for robust and transferable watermarks / Tang R. [et al.]. – URL: <https://openreview.net/forum?id=XHxRBwjPEQ> (дата обращения: 11.06.2023).
9. Менисов А. Б., Ломако А. Г., Дудкин А. С. Метод защиты нейронных сетей от компьютерных бэкдор-атак на основе идентификации триггеров закладок // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2022. – Т. 22, № 4. – С. 742–750.
10. Backdoor learning: A survey / Y. Li [et al.] // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. – URL: <https://arxiv.org/abs/2007.08745> (дата обращения: 11.06.2023).
11. Gu T., Dolan-Gavitt B., Garg S. Badnets: Identifying vulnerabilities in the machine learning model supply chain. – URL: <https://arxiv.org/abs/1708.06733> (дата обращения: 11.06.2023).
12. Neural cleanse: Identifying and mitigating backdoor attacks in neural networks / B. Wang [et al.] // 2019 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP). – IEEE, 2019. – P. 707–723.
13. Anti-backdoor learning: Training clean models on poisoned data / Y. Li [et al.] // Advances in Neural Information Processing Systems. – 2021. – Vol. 34. – P. 14900–14912.
14. Certified Neural Network Watermarks with Randomized Smoothing / A. Bansal [et al.] // International Conference on Machine Learning. – PMLR, 2022. – P. 1450–1465.
15. Resurrecting Trust in Facial Recognition: Mitigating Backdoor Attacks in Face Recognition to Prevent Potential Privacy Breaches / R. Zelenkova [et al.]. – URL: <https://arxiv.org/abs/2202.10320> (дата обращения: 11.06.2023).
16. Backdoor attacks and defenses in federated learning: State-of-the-art, taxonomy, and future directions / X. Gong [et al.] // IEEE Wireless Communications. – 2022. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9806416> (дата обращения: 11.06.2023).
17. 3d object representations for fine-grained categorization / J. Krause [et al.] // Proceedings of the IEEE international conference on computer vision workshops. – 2013. – P. 554–561.
18. Learning word vectors for sentiment analysis / A. Maas [et al.] // Proceedings of the 49th annual meeting of the association for computational linguistics: Human language technologies. – 2011. – P. 142–150.
19. Tresnet: High performance gpu-dedicated architecture / T. Ridnik [et al.] // Proceedings of the IEEE/CVF winter conference on applications of computer vision. – 2021. – P. 1400–1409.
20. Deep residual learning for image recognition / K. He [et al.] // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. – 2016. – P. 770–778.
21. Resmlp: Feedforward networks for image classification with data-efficient training / H. Touvron [et al.] // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2022. – Vol. 45, № 4. – P. 5314–5321.
22. Bert: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding / J. Devlin [et al.]. – URL: <https://arxiv.org/abs/1810.04805> (дата обращения: 11.06.2023).
23. Roberta: A robustly optimized bert pretraining approach / Y. Liu [et al.]. – URL: <https://arxiv.org/abs/1907.11692> (дата обращения: 11.06.2023).
24. Wu Y., Dobriban E., Davidson S. Deltagrads: Rapid retraining of machine learning models // International Conference on Machine Learning. – PMLR, 2020. – P. 10355–10366.
25. Zhang X., Liu C. A. Model averaging prediction by K-fold cross-validation // Journal of Econometrics. – 2023. – Vol. 235, № 1. – P. 280–301.

А. В. Антропова;
В. В. Козлов,
доктор технических наук, профессор;
С.Ф. Стельмах,
кандидат военных наук

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ СИСТЕМ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Для разрешения проблемы большого количества размерностей различных параметров при оценивании работоспособности технических объектов следует разработать свертки этих параметров во множество определяющих параметров. Желательным этапом формирования показателя(ей) технического состояния исследуемых объектов является получение выражения для выявления множества определяющих параметров. В качестве метода для выявления определяющих параметров целесообразно использовать морфологический анализ.

Ключевые слова: электромеханический привод, малый космический аппарат, моделирование, механизм.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследований, направленных на оценивание технического состояния обеспечивающих систем малых космических аппаратов (ОС МКА), обусловлена поиском современных технологий создания МКА, формирования технических требований к бортовым системам, универсальным космическим платформам МКА, моделирования и макетирования элементов МКА, разработки научно-методического аппарата по проектированию МКА и применению орбитальных группировок (ОГ) на их основе.

ОБЩИЙ ПОДХОД К ФОРМИРОВАНИЮ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТА

В статье рассматриваются механическая и электрическая составляющие типового электромеханического привода (ЭМП) ОС МКА.

Обобщенные параметры (P_1, P_2, P_3, P_4, P_5) вполне могут быть идентифицированы как физические параметры технических систем ОС МКА, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Физические параметры технических систем ОС МКА

Показатель	Физический параметр	Единица измерения	Обозначение
P_1	линейный размер	м	L
P_2	время	с	T
P_3	масса	кг	m
P_4	энергия	Дж	E
P_5	информация	бит	I

Это позволяет записать показатель технического состояния (ТС) ЭМП ОС МКА как функцию от выявленных с помощью морфологического анализа физических параметров в виде

$$P_{\text{ТС}} = f(m, L, t, E, I). \quad (1)$$

Следующим этапом формирования показателя ТС является представление общего выражения (1) в аналитическом виде. Выявленные физические параметры обладают значительной общностью, которая, в зависимости от назначения элементов ЭМП ОС МКА, позволяет агрегировать их в другие (привычные) производные от них физические параметры. Формирование выражения для показателя ТС должно учитывать следующие обстоятельства.

Во-первых, индивидуальность каждой сложной технической системы приводит к необходимости индивидуальной компоновки физических параметров для показателей ТС.

Во-вторых, метрологичность показателя ТС должна обеспечить диапазон его измерения от 0 до 1.

Поэтому общее выражение для показателя ТС может иметь вид

$$P_{\text{ТС}} = f\left(\bar{t}^{\alpha_1}, \bar{E}^{\alpha_2}, \bar{m}^{\alpha_3}, \bar{L}^{\alpha_4}, \bar{I}^{\alpha_5}\right),$$

где α_i – показатель степени физической величины, $i \in 1..n$. Здесь каждый физический параметр отнесен к своему назначенному значению, например:

$$\bar{t} = \frac{t_{\text{реально}}}{[t]_{\text{назначено}}}; \bar{E} = \frac{E_{\text{реально}}}{[E]_{\text{назначено}}}$$

и т. д.

Представленный здесь формализованный подход к формированию показателя ТС позволяет не только определить его значение, но и увидеть отсутствие описания некоторых понятий, которые учтены в действующих нормативно-технических документах [1].

Для морфологических образов, имеющих свою семантику, могут быть получены выражения для показателей ТС. В качестве исходной информации используем совокупность показателей известных процессов деградации ОС МКА [2, 3], к которым относятся:

- технологичность проектирования, производства и монтажа;
- износ;
- контактная и гальваническая коррозия;
- фреттинг-коррозия;
- деформация;
- усталость металлов;
- старение.

Выполненная процедура морфологического анализа [4] для показателя ТС выявила в качестве основной информации следующие определяющие параметры, такие как:

- 1) HV – твердость конструкционного материала $[H / \text{м}^2]$;
- 2) σ – уровень рабочих напряжений в конструкции $[H / \text{м}^2]$;
- 3) δ – фактическое значение толщин силовых конструкций $[м]$;
- 4) t – фактическое время работы $[с]$;
- 5) a – характерные ускорения рабочих процессов (возможно, виброускорения) $[м / с^2]$;
- 6) T_r – температура фактическая $[K^0]$;
- 7) T_0 – температура рабочая $[K^0]$.

Выявленное множество определяющих параметров получено строго на основании имеющегося банка научных и технических данных о деградации ОС МКА. Совокупность этих параметров является аргументом для показателя ТС.

Анализ процессов деградации в технических изделиях показывает, что объективная природа деградации подчиняется физически оправданной экспоненциальной зависимости (рис. 1 и табл. 2). Такой вид зависимости используется при формировании показателя работоспособности технических изделий:

$$P_{ТС} = \exp(\text{множество определяющих параметров}).$$

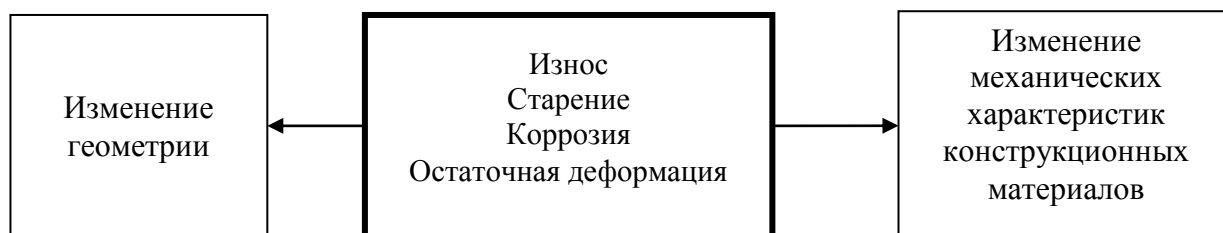


Рис. 1. Влияние процессов деградации

Таблица 2

Процессы деградации

Коррозия	Износ	Старение	Деформация
$t = k_1 Ra \cdot \exp\left(-\frac{k_2 ANf}{Ra}\right)$	$t = t_0 \cdot \exp\left(\frac{U_0 - Tds}{kT}\right)$	$\sigma = \sigma_0 \cdot \exp(-kt)$	$v = v_0 \cdot \exp\left[-\frac{H(\Delta\sigma)}{kT}\right]$

В табл. 2 представлены выражения, описывающие процессы деградации, где введены следующие обозначения:

1) для коррозии: A – амплитуда относительного смещения; k_1, k_2 – эмпирические коэффициенты; f – частота вибрации; N – число циклов; Ra – среднее арифметическое отклонение профиля;

2) для износа: t_0 – константа, имеющая смысл времени разрушения одного моля вещества трибосистемы при отсутствии внешнего механического поля; U_0 – энергия активации процесса разрушения вещества; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; ds – изменение энтропии;

3) для старения: σ – остаточная прочность; σ_0 – начальная прочность; t – время экспозиции; k – коэффициент, отражающий скорость изменения прочности;

4) для деформации: H – энергия активации; $\Delta\sigma$ – градиент напряжений; v_0 – предэкспоненциальный множитель.

С указанным здесь множеством необходимо провести операцию трансформации определяющих параметров в функцию показателя ТС, имеющую нулевую размерность. Для этой функции определены лишь аргументы:

$$P_{ТС} = f(HB, \sigma, \delta, a, T_r, T_0, t).$$

Теперь необходимо выяснить структуру этой функции. Для синтеза структуры такой функции привлекается аппарат теории размерности, согласно которой всякое соотношение

между размерными величинами можно сформулировать как соотношение между безразмерными величинами. Общий алгоритм формирования показателя работоспособности основан на π -теореме [5].

Согласно π -теореме, если известно, что рассматриваемая безразмерная величина является функцией ряда размерных величин, то эта функция может зависеть только от безразмерных комбинаций, составленных из определяющих n размерных величин:

$$P_{TC} = f(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n),$$

где π_i – комбинации определяющих параметров (p_i), имеющие нулевую размерность $\pi = 0$,

$$\pi = p_1^{z_1} p_2^{z_2} \dots p_n^{z_n} = c_1 [p_1]^{z_1} [p_2]^{z_2} \dots [p_n]^{z_n},$$

где z_i – показатель степени физической величины, $i \in 1..n$;

c_1 – неопределенная константа в соответствии с π -теоремой.

Если число основных единиц измерения n равно числу определяющих параметров k , которые имеют независимые размерности, то с помощью теории размерности эта зависимость полностью определяется с точностью до постоянного множителя:

$$P_{TC} = f(c_1 \cdot p_1^{m_1} p_2^{m_2} \dots p_n^{m_n}),$$

где m_i – показатель степени физической величины, $i \in 1..n$.

Таким образом, решение задачи зависит от определения числа основных (независимых) единиц измерения. Как известно, условия независимости единиц измерения, т. е. невозможность выразить один из параметров через другие, имеет выражение типа

$$[p_1]^\alpha \neq [p_2]^\alpha [p_3]^\beta [p_4]^\gamma [p_5]^\mu.$$

Для полученного набора определяющих параметров $HB, \sigma, \delta, t, a, T_r, T_0$ единицы измерения имеют определенное количество ($n = 7$).

Независимыми для этого набора единицами являются ($k = 4$): кг, с, м, K^0 . Следовательно, мы имеем дело со случаем ($n > k$), при котором структура искомой зависимости определяется по правилу $P_{TC} = f(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n)$. Согласно π -теореме количество безразмерных комплексов равно $n - k$, на основании чего можно записать искомую функцию в виде следующих безразмерных комплексов:

$$P_{TC} = f\left(c_1 \cdot \frac{\Delta P}{HB} \cdot \frac{T_r}{T_0} \cdot \frac{t^2 a}{\delta}\right),$$

тогда можно синтезировать выражение для показателя ТС в виде

$$P_{TC} = \frac{t_{ост}}{t_R} = \exp\left(-c_1 \cdot \frac{\sigma}{HB} \cdot \frac{T_r}{T_0} \cdot \frac{t^2 a}{\delta}\right), \quad (2)$$

где $t_{ост}$ – остаточное время работы;

t_R – время ресурса.

Анализ выражения (2) показывает, что рост уровня рабочих напряжений (σ), также как и повышение рабочей температуры ($T_r > T_{ост}$) приводит к снижению показателя ТС. Общая продолжительность работы изделия, очевидно, снижает его ресурс [4, 6].

Снижение фактического значения толщин (δ) конструктивных элементов изделия приводит к снижению показателя ТС. С ростом характерных динамических параметров (виброускорений) показатель ТС падает.

Поскольку связь между ресурсом, остаточным временем работы и фактическим временем наработки определяется выражением $t_R = t_{ост} + t_{факт}$, то при принятой системе оценивания показателя ТС

$$P_{TC} = \frac{t_{ост}}{t_R} = \frac{t_{ост}}{t_{ост} + t_{факт}}$$

появляется возможность расчета остаточного времени работы

$$t_{ост} = t_{факт} \left(\frac{P_{TC}}{1 - P_{TC}} \right)$$

и расчета ресурса

$$t_R = t_{факт} + t_{ост} = t_{факт} \left(\frac{1}{1 - P_{TC}} \right).$$

При расчете показателя ТС для снятия неопределенности, обусловленной неопределенным сомножителем, следует ввести значение показателя ТС на период начала функционирования $[P_{TC}^0]$. Назначив величину начального показателя ТС $[P_{TC}^0] = 0,999$, для начального времени функционирования $t = 1$ можно записать

$$[P_{TC}^0] = \exp \left(-const \cdot \frac{\sigma}{HB} \cdot \frac{T_r}{T_0} \cdot \frac{t_0^2 a}{\delta} \right).$$

Тогда

$$const = -\ln [P_{TC}^0] \cdot \left(\frac{\sigma}{HB} \cdot \frac{T_r}{T_0} \cdot \frac{t_0^2 a}{\delta} \right)^{-1},$$

откуда

$$P_{TC} = \exp \left(\ln [P_{TC}^0] \cdot \frac{\bar{\sigma}}{HB} \cdot \frac{\bar{T}_r}{T_0} \cdot \frac{\bar{t}^2 \cdot \bar{a}}{\bar{\delta}} \right),$$

где $\bar{\sigma} = \frac{\sigma(t)}{(\sigma)_0}$; $\frac{HB}{HB_0} = \frac{HB(t)}{HB_0}$; $\frac{\bar{T}_r}{T_0} = \frac{T_r(t)}{(T_r)_0}$; $\frac{\bar{T}_0}{T_0} = \frac{T_0(t)}{(T_0)_0}$; $\bar{t} = \frac{t}{t_0}$; $\bar{a} = \frac{a(t)}{a_0}$; $\bar{\delta} = \frac{\delta(t)}{\delta_0}$ – относитель-

ные значения параметров ТС, а величина $[P_{TC}^0]$ является неким показателем качества оцениваемого изделия. Ее значение существенно влияет на величину назначенного ресурса изделия. Если задать предельное низкое значение показателя ТС ($P_{TC}^{предел}$), за которым эксплуатация невозможна, то становится возможным определить значение показателя ресурса t_R , что показано на рис. 2.

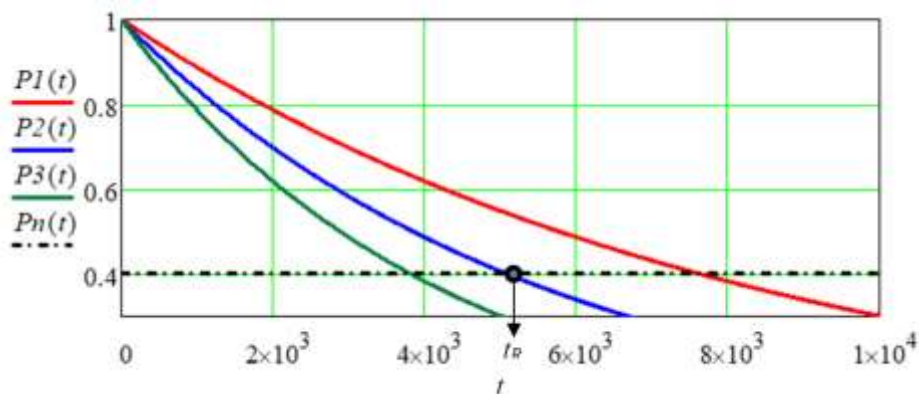


Рис. 2. Влияние начального значения показателя ТС на длительность работы изделия

На рисунке приняты следующие обозначения:

$$P1(t) - P_{ТС} \text{ при } [P_{ТС}^0] = 0,9999;$$

$$P2(t) - P_{ТС} \text{ при } [P_{ТС}^0] = 0,99985;$$

$$P3(t) - P_{ТС} \text{ при } [P_{ТС}^0] = 0,9998;$$

$$Pn(t) = P_{ТС}^{\text{предел}}.$$

Очевидно, влияние начального значения показателя ТС на ресурс изделия. Представленный здесь подход в определении показателя ТС изделия позволяет: во-первых, при наличии теоретических зависимостей деградации определяющих параметров (в рассматриваемом примере $\sigma(t)$, $HB(t)$, $Tr(t)$, $a(t)$, $\delta(t)$) получить теоретическую зависимость показателя ТС и на ее основе получить значения показателей назначенного и фактического ресурса; во-вторых, при фактических измерениях этих параметров построить фактическую кривую показателя ТС и по ней узнать фактический остаточный ресурс.

ФОРМИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТА ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА

Используем в качестве исходной информации совокупность показателей известных процессов деградации механического компонента привода [7, 8], таких как:

- технологичность проектирования, производства и монтажа;
- износ;
- контактная и гальваническая коррозия;
- фреттинг-коррозия;
- деформация;
- усталость металлов;
- старение.

Кроме того, используем в этом же качестве известные соотношения для оценивания процессов деградации. Процедура морфологической декомпозиции их содержания позволяет выявить в качестве основной информации следующие определяющие параметры:

1) уровень рабочих напряжений при работе редуктора – $\sigma \left[\frac{H}{M^2} \right];$

2) твердость материала колеса (по Бринеллю) – $HB \left[\frac{H}{M^2} \right];$

3) величины зазоров между соприкасающимися профилями – h [м];

4) площади контактируемых поверхностей – F [м²];

5) время работы – t [с];

6) ресурс элементов механического компонента привода (зубчатых колес, подшипников) – R [с].

Становится возможным синтезировать выражение для показателя ТС механической части привода в виде

$$P_{ТС}^{\text{мех}} = \exp \left(\ln [P_{ТС}^0] \cdot \frac{\sigma}{HB} \cdot \frac{h^2}{F} \cdot \frac{t}{R} \right). \quad (3)$$

Анализ выражения (3) показывает, что при снижении твердости конструкционных материалов, из которых состоит механический привод HB , растет аргумент экспоненциальной функции \exp и снижается время остаточного ресурса $t_{ост}$.

Рост рабочих напряжений, вызванных длительной эксплуатацией σ , также как и увеличение зазоров между соприкасающимися профилями h , приводит к снижению показателя ТС. Общая продолжительность работы привода t , очевидно, снижает его ресурс.

Снижение площадей контактируемых поверхностей профилей зубьев приводных и ведущих колес F , равно как и снижение значений ресурсов элементов механического привода R , приводит к снижению показателя ТС привода [4].

Таким образом, можно сделать вывод, что для показателя ТС механического компонента привода наиболее влиятельным являются значения зазоров в контактируемых профилях. Поскольку твердость материалов, из которых выполнен привод, площади контактируемых поверхностей, время работы привода, ресурсы элементов привода – величины заданные либо легко искомые, то по измерению зазоров и (или) рабочих напряжений можно судить о ТС исследуемого механического привода. Более того, если в некоторых случаях замеры зазоров между контактирующими профилями не представляются возможными, то регистрировать уровень рабочих напряжений возможно при необходимой чувствительности регистрирующих приборов системы управления привода.

ФОРМИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТА ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА

Для электрического компонента ЭМП в качестве исходной информации использована совокупность показателей известных процессов деградации, таких как:

- технологичность проектирования, производства и монтажа;
- повреждение изоляции;
- перегрев;
- межвитковое замыкание при ухудшении изоляции;
- повышенный нагрев двигателя и падение момента на валу;
- замыкание между обмотками из-за механической вибрации;
- замыкание обмотки на корпус;
- обрыв обмотки;
- износ и трение в подшипниках;
- вибрация из-за дисбаланса;
- тепловое старение;
- электрическое старение;
- коммутационное перенапряжение;
- ток утечки;
- развитие местных дефектов в изоляции;
- колебание напряжения;
- среднеквадратичное отклонение рабочего тока;
- дисбаланс и расшатанность вала;
- механические напряжения на валу.

При оценивании процессов деградации и выполнении процедур морфологической декомпозиции удается выявить в качестве ключевой информации следующие определяющие параметры:

- 1) механический момент, развиваемый электродвигателем,

$$M = C_M I_a \Phi ,$$

где C_M – постоянная, зависящая от конструкции;
 $I_{\text{я}}$ – ток якоря;
 Φ – магнитный поток.

2) момент сил трения в подшипниках электродвигателя

$$M_{\text{тр}} = k_{\text{тр}} F r_{\text{под}},$$

где $k_{\text{тр}}$ – коэффициент трения;
 $r_{\text{под}}$ – радиус подшипника;
 F – сила трения в подшипнике,

$$F = p \cdot S,$$

где p – удельное давление на обойму подшипника;
 S – площадь контакта ротора и подшипника;

3) электрическую мощность, потребляемую электродвигателем,

$$P = U \cdot I,$$

где U, I – напряжение и сила тока;

4) потери электрической мощности

$$\Delta P = 3 \cdot I \cdot R,$$

где I – модуль полного тока;
 R – активное сопротивление;

5) фактическое значение толщин (силовых) конструкций δ ;

6) фактическое время работы t [с];

7) характерные ускорения рабочих процессов (возможно, виброускорения) a ;

8) температуру фактическую T_r ;

9) температуру рабочую T_0 .

В результате можно синтезировать выражение для показателя ТС электрической части привода в виде

$$P_{\text{ТС}}^{\text{эл}} = \exp \left(\ln [P_{\text{ТС}}^{\text{эл}0}] \cdot \frac{M}{M_{\text{тр}}} \cdot \frac{U \cdot I}{P_{\text{эл.потерь}}} \cdot \frac{a \cdot t^2}{\delta} \cdot \frac{|T_r - T_0|}{T_r} \right).$$

Таким образом, даже в начале летной эксплуатации (на начальной стадии зарождения процессов деградации) существует возможность оценивания качества функционирования ЭМП ОС МКА. Естественно, что по мере выработки назначенных показателей ресурса доля деградации будет увеличиваться. Контроль за ростом деградации позволит выработать суждение о текущем ТС привода. Для оценивания уровня деградации привода предлагается использовать соотношение

$$P_{\text{ТС}}^{\text{ИП}} = P_{\text{ТС}}^{\text{эл}} \cdot P_{\text{ТС}}^{\text{мех}}.$$

Для наблюдения и контроля за постепенно развивающейся в ЭМП ОС МКА деградацией целесообразно ввести в бортовую систему управления ЭМП ОС МКА систему функционального мониторинга, включающую в себя приборы для контроля за ТС привода и математическое обеспечение процессов эксплуатации ЭМП ОС МКА, которое позволяет создать банк данных роста показателя деградации, необходимого для идентификации текущего ТС ЭМП ОС МКА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлена методика формирования показателей ТС компонентов ЭМП ОС МКА, которая позволит провести анализ функционирования ЭМП ОС МКА в условиях развития деградационных процессов, для чего потребуются построение диагностических моделей формирования множества контролируемых параметров. При этом учтено, что появление и развитие деградационных процессов в системах ОС МКА может происходить как по причине штатного, так и нештатного функционирования элементов ОС. Поэтому оценивание последствий длительной летной эксплуатации элементов и принятие решений на управление ОС МКА должны основываться на результатах анализа всех взаимосвязанных элементов агрегатов, функционирующих до появления нештатного состояния. Это обосновывает введение понятия «динамического портрета», включающего помимо целевой системы ЭМП и другие взаимосвязанные с ней системы.

Список используемых источников

1. ГОСТ Р 27.102-2021. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения [взамен ГОСТ 27.002-2015; введ. 01.01.2022]. – М. : Изд-во стандартов, 2022. – 46 с.
2. Трение изнашивание и смазка : справ. : в 2 кн. – М. : Машиностроение, 1978.
3. Орлов П. И. Основы конструирования : справ. пособие : в 3 кн. – М. : Машиностроение, 1977.
4. Методика оценивания надежности транспортирования ракетной техники по внеполигонным железнодорожным магистралям / В. В. Козлов [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – Вып. 4. – С. 251–259.
5. Седов Л. И. Механика сплошных сред. – М. : Наука, 1970. – 492 с.
6. Карташев Г. Д. Принципы расходования ресурса и их использования для оценки надежности. – М. : Знание, 1984. – 100 с.
7. Благовещенский Ю. Н. Аксиоматическая теория накопления усталостных повреждений // Заводская лаборатория. – 1969. – № 10. – С. 1204–1213.
8. Самойлов Н. С., Самойлов А. Н. Ускоренные методы определения выносливости и термостойкости. – СПб. : НПО «Профессионал», 2012. – 324 с.

Е. В. Басотин,
кандидат технических наук, доцент;
В. М. Локтионов;
И. С. Щербина,
кандидат технических наук, доцент

МОДЕЛЬ КОНФЛИКТНЫХ СИТУАЦИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ В ПРОЦЕССЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В статье рассматривается имитационная модель, позволяющая на основе экспериментально полученных данных о надежности оборудования и временных характеристик процесса испытаний ракетно-космических комплексов, проводимых независимо друг от друга на различных стартовых позициях, провести моделирование конфликтных ситуаций и оценить качество функционирования измерительного комплекса космодрома.

Ключевые слова: состояние организационно-технической системы, имитационная модель, конфликтная ситуация.

ВВЕДЕНИЕ

Сбор и обработка информации о фактических значениях эксплуатационных характеристик оборудования обеспечиваются измерительным комплексом космодрома (ИКК) – сложной организационно-технической системой, в рамках которой осуществляются получение, сбор, обработка и анализ информации о значениях большого количества параметров, характеризующих качество функционирования элементов РКК. В случае нештатного функционирования изделий на активном участке траектории при аварийных пусках ИКК, как правило, является единственным источником оперативной измерительной информации о поведении изделия в полете, получаемой в реальном масштабе времени.

Объем полученной измерительной информации оказывает непосредственное влияние на результаты анализа процессов функционирования РКК и определяется способностью ИКК непрерывно принимать измерительную информацию в период проведения испытаний. В процессе эксплуатации оборудования ИКК возможны отказы, приводящие к безвозвратной потере необходимой информации, если отказ произошел в ходе сеанса, либо невозможности своевременно начать его, если отказ – скрытый. Кроме отказов на процесс функционирования ИКК оказывает влияние интервал приема измерительной информации, в общем случае характеризующийся случайным временем окончания, зависящим от того, штатно ли проходят испытания конкретного изделия. В условиях одновременного проведения работ на нескольких позициях может сложиться конфликтная ситуация – ситуация, характеризующаяся невозможностью приема оборудованием ИКК измерительной информации одновременно от нескольких изделий в установленное время и приводящая к снижению качества функционирования ИКК. Это обуславливает актуальность данной работы.

Требуется оценить возможности ИКК по непрерывному приему измерительной информации в условиях возникновения отказов, испытаний РКК, которые одновременно проводятся на различных позициях и независят друг от друга.

В этой связи целью исследования является разработка имитационной модели конфликтных ситуаций, возникающих в процессе функционирования ИКК, позволяющей на основе данных о надежности оборудования ИКК и временных характеристик технологических процессов оценить качество функционирования ИКК.

ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА КОСМОДРОМА

Процесс эксплуатации ИКК условно можно представить в виде последовательных этапов поддержания в готовности к применению и применения по назначению.

В ходе изменения готовности оборудования ИКК в процессе эксплуатации на заданном интервале времени $[t, t+\tau]$ под действием потока отказов с интенсивностью $\lambda(t)$ оборудование с определенной вероятностью $p(t)$ переходит в неработоспособное состояние и подлежит восстановлению. Восстановление работоспособного состояния выполняется силами личного состава эксплуатирующей организации или с привлечением специалистов предприятия-изготовителя с интенсивностью μ .

В общем случае поток отказов не является простейшим и для разнородного оборудования его интенсивность с течением времени монотонно возрастает вследствие старения и износа оборудования [1]. Для поддержания оборудования ИКК в готовности используется традиционная плано-предупредительная стратегия проведения технических обслуживаний, в рамках которой силами эксплуатирующей организации выполняется комплекс профилактических мероприятий на оборудовании в объеме и с периодичностью, установленными в эксплуатационной документации.

Процесс эксплуатации оборудования ИКК можно описать как последовательную смену состояний: состояния проведения сеансов измерений (применения) и состояния ожидания применения, в течение которого выполняются мероприятия поддержания в готовности к применению по назначению. Переход из состояния ожидания в состояние применения осуществляется в соответствии с планом проведения сеансов измерений в запланированные заранее моменты времени или по команде, время поступления которой, в общем случае, является случайным. При планировании необходимого количества оборудования для применения по предназначению необходимо знать, задействовано оно или нет. С учетом этого условия будем считать, что оборудование готово к применению по назначению, если оно находится в работоспособном состоянии, полностью подготовлено и не задействовано для выполнения других задач [2].

На рис. 1 представлены модели, используемые для описания ИКК на этапах поддержания оборудования в готовности и применения.

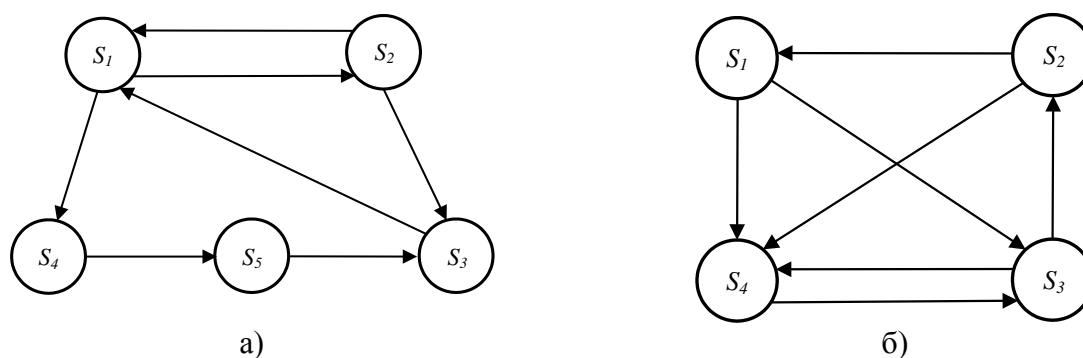


Рис. 1. Граф состояний оборудования ИКК:
а – при поддержании в готовности к применению; б – при подготовке
и применении по назначению

В модели поддержания оборудования ИКК в готовности к применению по назначению (рис. 1, а) обозначены:

S_1 – работоспособное состояние;

S_2 – состояние проверок работоспособности оборудования;

S_3 – состояние восстановления оборудования после возникновения скрытых отказов и отказов, выявленных при проведении проверок работоспособности оборудования;

S_4 – неработоспособное состояние (оборудование находится в состоянии скрытого отказа);

S_5 – состояние проведения проверок работоспособности оборудования, находящегося в состоянии скрытого отказа.

В модели подготовки и применения оборудования по назначению (рис. 1,б) его состояния имеют следующие обозначения [3]:

S_1 – оборудование выполняет целевую задачу (проводит сеанс измерений);

S_2 – оборудование готово к выполнению задачи (исправно, прошло подготовку к применению);

S_3 – оборудование исправно и находится в режиме подготовки к применению;

S_4 – оборудование находится в режиме восстановления.

Для сбора и обработки информации в составе ИКК используют разнородное оборудование, предназначенное для приема различных видов измерительной информации – средства приема параметров траектории, средства приема и регистрации телеметрической информации, средства частотно-временного обеспечения, средства обработки и передачи информации и т. д. С точки зрения формализации описания процесса функционирования ИКК разнородность будет заключаться в различных законах распределения времени возникновения отказов, времени восстановления оборудования и, собственно, параметров этих законов. Разработка аналитической модели, позволяющей адекватно учесть эти особенности в условиях параллельной работы оборудования и формирования заявок на проведение сеансов измерений, будет связана с существенными трудностями.

Одним из выходов из сложившейся ситуации является использование имитационного моделирования, нашедшего широкое применение для описания функционирования сложных организационно-технических систем. Имитационное моделирование позволяет по исходным данным получить сведения о состояниях процесса функционирования в определенные моменты времени, дающие возможность оценить характеристики исследуемой системы. При этом сохраняются структура и последовательность протекания имитируемых событий, составляющих этот процесс. Имитационные модели позволяют более адекватно описывать различные элементы системы, например нелинейные или дискретные, учитывать разнообразие связей между ними, временную логику функционирования и другие трудно формализуемые факторы, например влияние квалификации персонала и условий выполнения технологических операций на показатель оперативности выполнения работ.

Таким образом, для оценивания качества функционирования оборудования ИКК необходимо разработать имитационную модель, описывающую зависимость показателей качества функционирования ИКК и его составных частей от управляемых переменных (периодичности и объемов технического обслуживания), от исходного технического состояния оборудования (наличия скрытых отказов), от режимов применения ИКК и от характеристик условий его функционирования.

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ КОНФЛИКТНЫХ СИТУАЦИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ В ПРОЦЕССЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА КОСМОДРОМА

Для разработки модели необходимы следующие исходные данные:

- сведения о составе и структуре видов оборудования ИКК и связях между ними;
- сведения о периодичности и времени выполнения операций контроля технического состояния;
- значения показателей безотказности и ремонтпригодности оборудования.

Получение требуемой информации возможно в процессе эксплуатации оборудования ИКК по результатам анализа эксплуатационных документов, содержащих сведения о продолжительности и периодичности выполнения эксплуатационных мероприятий.

Для разработки имитационной модели конфликтных ситуаций воспользуемся программной средой GPSS Studio Student (версия 1.5.2.0), реализующей хорошо зарекомендовавшую себя для исследования технологических процессов методологию дискретно-событийного моделирования [4].

Структура разработанной имитационной модели конфликтных ситуаций (рис. 2,а) состоит из совокупности блоков, представляющих собой модели оборудования, количество и логика работы которых определены проводимыми испытаниями конкретного изделия РКК. Структурными элементами ИКК являются антенно-фидерные устройства (АФУ), система внешне-траекторных измерений (ВТИ) и малогабаритные приемо-регистрирующие станции (МПРС).

Структура имитационной модели функционирования оборудования комплекса (рис. 2,б) представляет собой совокупность трех взаимосвязанных сегментов.

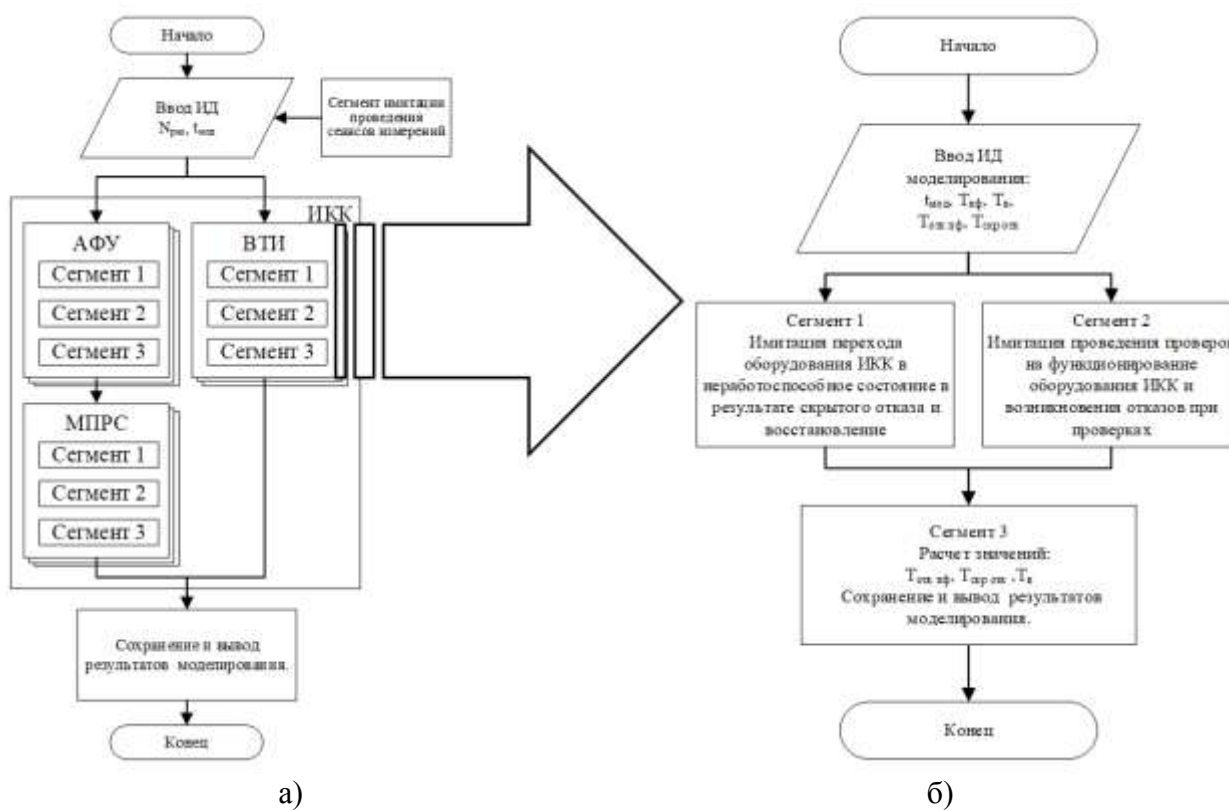


Рис. 2. Структура имитационной модели:
а – конфликтных ситуаций; б – функционирования оборудования ИКК

Функциями, реализуемыми сегментами, являются:

- имитация перехода оборудования в неработоспособное состояние в результате скрытого отказа и восстановления;
- имитация проведения проверок на функционирование и возникновения отказов при проверках;
- расчет значений $T_{отк пф}, T_{скр отк}, T_{в пф}, T_{в скр}$.

Моделируемый процесс представляется в виде потока событий, времена наступления которых, в общем случае, рассматриваются как случайные. Разработанные сегменты имитационной модели оборудования являются универсальными и позволяют построить модель любого вида оборудования, независимо от структуры и количества элементов.

Каждый сегмент состоит из блоков (рис. 3), которые задают логику функционирования имитационной модели и определяют пути движения транзактов (требований, заявок, событий), возникающих в процессе функционирования ИКК и изменяющих состояние его элементов. Транзакты это динамические объекты, которые являются аналогами событий реальных систем.

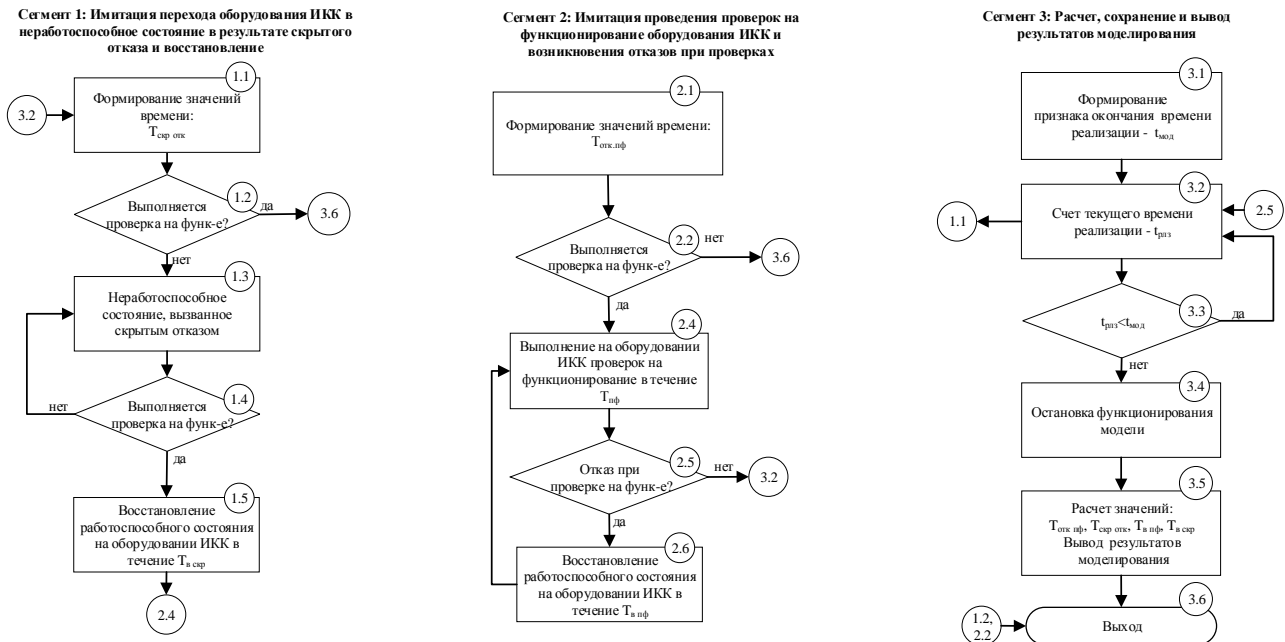


Рис. 3. Структура сегментов имитационной модели функционирования оборудования ИКК

В первом сегменте имитируется переход системы в неработоспособное состояние в результате скрытого отказа. В блоке 1.1 формируется случайное значение времени возникновения скрытого отказа $T_{\text{скр.отк}}$, закон распределения которого в соответствии с [5] будем считать экспоненциальным. На следующем шаге проверяется условие выполнения проверки на функционирование, если условие выполняется, то транзакт покидает модель, если нет, то система переходит в неработоспособное состояние в результате скрытого отказа. Система находится в неработоспособном состоянии, пока не начнется проверка на функционирование, после чего она переходит в состояние восстановления работоспособного состояния в течение случайного времени $T_{\text{в.скр}}$ и проверки работоспособности в блоке 2.4.

Во втором сегменте имитируется проведение проверок на функционирование системы и возникновение отказов. После формирования случайного значения времени $T_{\text{отк.пф}}$ в блоке 2.1, проверяется условие выполнения проверки на функционирование. Если условие не выполняется, то транзакт выводится из модели, если выполняется, то на система переходит в состояние проверки на функционирование через время $T_{\text{пф}}$. На следующем шаге проверяется условие возникновения отказа при проверке. При возникновении отказа оборудования происходит восстановление его работоспособного состояния в течение времени $T_{\text{в.пф}}$, после чего проверка на функционирование проводится заново. Если отказ не произошел, транзакт переходит в блок 3.2 – счет текущего времени реализации модели $t_{\text{рлз}}$.

В третьем сегменте формируется время моделирования $t_{\text{мод}}$, его сравнение с текущим временем реализации модели $t_{\text{рлз}}$ и проводится расчет значений $T_{\text{отк.пф}}$, $T_{\text{скр.отк}}$, $T_{\text{в.пф}}$, $T_{\text{в.скр}}$ и вывод результатов моделирования.

Будем предполагать, что все оборудование на момент начала эксперимента работоспособно.

Для представления логики работы модели воспользуемся упрощенными исходными данными: средним временем возникновения скрытых отказов $T_{\text{скр отк}} = 8760$ ч; средним временем возникновения отказов при проведении проверок $T_{\text{отк пф}} = 100$ ч; периодичностью контроля $T_{\text{пф}} = 2160$ ч; продолжительностью проведения проверки $T_{\text{п}} = 170 \pm 20$ ч; средним временем восстановления при скрытом и явном отказах $T_{\text{в скр}} = 350 \pm 3$ ч и $T_{\text{в пф}} = 150 \pm 2$ соответственно.

На рис. 4 представлена временная диаграмма полученных конфликтных ситуаций в результате моделирования. Переходу оборудования из одного состояния в другое соответствует скачкообразное изменение уровня соответствующей кривой, при этом максимальный уровень соответствует нахождению оборудования в одном из следующих состояний:

- 1) неработоспособном, вызванном скрытым отказом;
- 2) периодических проверок;
- 3) восстановления после выявления скрытого отказа;
- 4) неработоспособном, вызванном отказом, выявленным при проверке;
- 5) восстановления после отказа, выявленного при проверке;
- 6) работоспособном и готовом к применению;
- 7) применения по назначению.

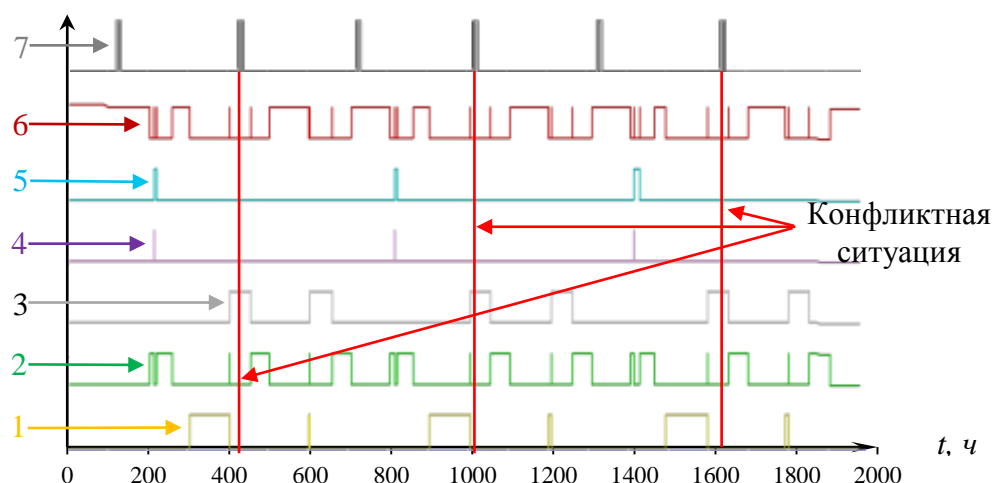


Рис. 4. Временная диаграмма полученных конфликтных ситуаций

На диаграмме показаны конфликтные ситуации (выделены вертикальными линиями), вызванные пересечением времени начала поведения испытаний РКК и времени восстановления работоспособного состояния оборудования ИКК вследствие выявления скрытого отказа, что приводит к потере измерительной информации, необходимой для проведения анализа параметров, характеризующих состояние и режимы работы отдельных агрегатов и изделия в целом. Полученный результат моделирования позволяет оценить качество функционирования ИКК.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования свидетельствуют о том, что разработанная имитационная модель является эффективным инструментом получения прогнозных оценок показателей качества функционирования ИКК в реальных условиях эксплуатации оборудования, позволяющим учесть возможность параллельного проведения испытаний РКК и обеспечивающим органы

управления их эксплуатацией дополнительной информацией, которая используется при принятии решений о планировании эксплуатационных процессов. Кроме того, модель позволяет получить наглядное представление о причинах и моментах возникновения конфликтных ситуаций, которые вызваны испытаниями изделий РКК, проводимыми на различных стартовых позициях, и отказами оборудования ИКК.

Список используемых источников

1. Reliability centered maintenance. Guide for facilities and collateral equipment. – URL: http://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/nasa_rsmguide.pdf (дата обращения: 20.07.2023).
2. Обеспечение надежности сложных технических систем : учебник / А. Н. Миронов [и др.]. – СПб. : Лань, 2011. – 352 с.
3. Эксплуатация радиотехнических систем: Учебник. / В. В. Гладченко [и др.]. – М. : МО СССР, 1990. – 435 с.
4. Бражник А. Н. Имитационное моделирование: возможности GPSS World. – СПб. : Реноме, 2006. – 439 с.
5. Волков Л. И. Управление эксплуатацией летательных комплексов. – М. : Высш. шк., 1981. – 238 с.

Р. М. Вивчарь,

кандидат технических наук;

Е. Н. Есипов;

А. С. Кокарев,

кандидат технических наук, доцент;

Д. В. Решетников,

кандидат технических наук, доцент

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ НАЗЕМНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ КАК ИНСТРУМЕНТ ОБОСНОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

В статье выявлена проблемная ситуация, заключающаяся в наличии тенденции к превышению регламентированных в эксплуатационно-технической документации временных нормативов выполнения технологических операций на объектах наземной космической инфраструктуры, обеспечивающих запуски космических аппаратов.

Предложен один из подходов к решению выявленной проблемы путем обоснования параметров технического обслуживания составных частей объектов наземной космической инфраструктуры с использованием агентной имитационной модели функционирования их системы эксплуатации. Разработанная модель отличается использованием ядерной оценки плотности вероятности (гауссовой ядерной функции) для нахождения вероятности достижения комплекса целей функционирования системы эксплуатации, позволяет определить зависимость между показателями эффективности системы эксплуатации и параметрами системы технического обслуживания (объем, периодичность и стоимость).

Ключевые слова: система эксплуатации, система технического обслуживания, наземная космическая инфраструктура, имитационная модель.

ВВЕДЕНИЕ

Значительная часть технологического оборудования (ТлОб), составных частей (СЧ) объектов наземной космической инфраструктуры (ОНКИ), обеспечивающих в настоящее время запуски на целевые орбиты космических аппаратов, введена в эксплуатацию в 70-х начале 80-х годов прошлого века и система эксплуатации (СЭ) такого оборудования является недостаточно гибкой и не в полной мере приспособлена к выполнению задач эксплуатации. В частности, как показывает опыт эксплуатации, приблизительно 40% технологических операций, проводимых на ТлОб, находящемся в эксплуатации длительное время, превышают регламентированную в эксплуатационно-технической документации продолжительность выполнения.

Отрицательная (в смысле увеличения времени) динамика продолжительности выполнения технологических операций обусловлена, прежде всего, увеличением количества скрытых отказов элементов ТлОб, которые выявляются непосредственно в ходе выполнения работ. Для минимизации количества скрытых отказов необходимо адаптировать существующую СЭ ОНКИ к решению данной задачи.

В настоящее время СЭ ОНКИ предусматривает использование регламентной (календарной) стратегии технического обслуживания (ТО) [1, 2]. Решение выявленной проблемы возможно двумя способами: первый способ – изменить стратегию проведения ТО ТлОб; второй способ – обосновать заново значения параметров существующей стратегии ТО. На наш взгляд, второй способ наиболее предпочтителен, так как является наименее ресурсозатрат-

ным и будет удовлетворять положениям ряда основополагающих документов [3–5] в части, касающейся необходимости снижения эксплуатационных затрат. Изменение стратегии технического обслуживания потребует значительных финансовых и временных ресурсов, необходимости пересмотра нормативно-технической документации.

Для обоснования значений параметров существующей стратегии ТО необходима разработка соответствующего научно-методического аппарата. В основе научно-методического аппарата должна лежать модель функционирования СЭ ОНКИ, позволяющая установить связь между показателями эффективности СЭ и параметрами системы ТО, которыми являются объем и периодичность, а также стоимостные показатели.

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МОДЕЛЕЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ НАЗЕМНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Научных работ, посвященных моделированию функционирования СЭ ОНКИ, достаточно много [1, 6–9], однако они не лишены недостатков.

В работе [6] представлены модели с обслуживанием по состоянию с постоянным мониторингом технического состояния, с обслуживанием по состоянию с периодическим мониторингом технического состояния и без планового ТО, однако, как говорилось выше, вариант смены стратегии ТО является нерациональным.

В работе [1] представлена модель функционирования СЭ ОНКИ с календарной стратегией ТО, однако в ней не учитываются такой параметр, как объем ТО и параметры системы обеспечения запасными частями (ЗЧ).

Модель [7] используется для пространственно-распределенного объекта эксплуатации, кроме того, в ней не учтены параметры ресурсоемкости.

В научной статье [8] представлена модель, которая адаптирована под передающий радиотехнический объект, соответственно, применить ее к СЭ ОНКИ не представляется возможным.

При описании модели [9] был учтен комплекс параметров, характеризующих показатели эффективности СЭ ОНКИ, но не учтен объем проводимого ТО.

Таким образом, можно сделать вывод, что существующие модели функционирования СЭ не позволяют в полной мере оценить влияние параметров системы ТО на функционирование СЭ ОНКИ. В данной статье предлагается к рассмотрению модель СЭ ОНКИ с календарной стратегией ТО, лишенная перечисленных выше недостатков.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Формально задача установления зависимости показателей эффективности функционирования СЭ ОНКИ от параметров ТО может быть представлена следующим образом.

Дано:

$\tau_{\text{эксп}}^{\text{СЭ}}$ – период функционирования СЭ ОНКИ;

$X_1 = \{I, J_i, K_{ij}\}$ – множество параметров, характеризующих состав ТлОб ОНКИ, где I – количество систем, участвующих в процессе функционирования СЭ ОНКИ, J_i – количество типов элементов одного типа наименования (ЭОТН) в i -й системе, K_{ij} – количество ЭОТН в j -м типе i -й системы, $t_p^{\text{ТР}}$ – требуемая продолжительность работ, $C^{\text{ТР}}$ – приемлемая стоимость функционирования СЭ ОНКИ;

$X_2 = \{\lambda_{ij}, t_{устр\ ij}^{отк}, C_{пров\ ij}^{ЭОТН}\}$ – множество параметров, характеризующих надежность параметры ТлОб, где λ_{ij} – интенсивность отказов ЭОТН j -го типа i -й системы, $t_{устр\ ij}^{отк}$ – продолжительность устранения отказа ЭОТН j -го типа i -й системы, $C_{пров\ ij}^{ЭОТН}$ – стоимость проведения ТО одного ЭОТН j -го типа i -й системы;

$X_3 = \{z_{ij}, t_{дост\ ij}^{эстр}, \tau_{поп\ i}^{ЗИП}, C_{зак\ ij}^{ЭОТН}, C_{обсл\ ij}^{ЭОТН}, C_{хран\ ij}^{ЭОТН}, C_{пл.дос\ ij}^{ЭОТН}, C_{экс.дос\ ij}^{ЭОТН}\}$ – множество параметров, характеризующих систему обеспечения ЗЧ, где z_{ij} – количество ЗЧ j -го типа i -й системы, $t_{дост\ ij}^{эстр}$ – продолжительность экстренной доставки ЭОТН j -го типа i -й системы, $\tau_{поп\ i}^{ЗИП}$ – периодичность пополнения комплекта ЗИП i -й системы, $C_{зак\ ij}^{ЭОТН}$ – стоимость закупки одной ЗЧ j -го типа i -й системы; $C_{обсл\ ij}^{ЭОТН}$ – стоимость обслуживания одного ЭОТН j -го типа i -й системы; $C_{хран\ ij}^{ЭОТН}$ – стоимость хранения одной ЗЧ j -го типа i -й системы; $C_{пл.дос\ ij}^{ЭОТН}$ – стоимость плановой доставки одной ЗЧ j -го типа i -й системы; $C_{экс.дос\ ij}^{ЭОТН}$ – стоимость экстренной доставки одной ЗЧ j -го типа i -й системы;

$X_4 = \{\vec{a}_1, \vec{a}_2, \dots, \vec{a}_o, \dots, \vec{a}_O\}$ – множество, характеризующее выполняемую работу;

$\vec{a}_o = [a_{o1}, \vec{a}_{o2}, \vec{a}_{o3}]^T$ – вектор, характеризующий параметры операции данной работы, где a_{o1} – продолжительность операции; $\vec{a}_{o2} = [b_1, b_2, \dots, b_o, \dots, b_{O-1}]^T$ – вектор, характеризующий предшествующие операции, $b_o \in [0, 1]$ – признак, того что является ли o -я операция предшествующей, если $b_o = 0$ – операция не является предшествующей, а $b_o = 1$ – операция является предшествующей; $\vec{a}_{o3} = [d_1, d_2, \dots, d_i, \dots, d_I]^T$ – вектор, характеризующий системы участвующие в операции, $d_i \in [0, 1]$ – признак, участия системы в операции, если $d_i = 0$ – система не участвует в проведении операции, а $d_i = 1$ – система участвует в проведении операции;

$X_5 = \{x_{51}, x_{52}, \dots, x_{5m}, \dots, x_{5M}\}$ – множество, характеризующее план выполнения работ, где x_{5m} – продолжительность от начала функционирования СЭ ОНКИ до начала m -й работы, M – количество работ.

Найти:

$$t_p^m = f_1(X_6), C = f_2(X_6). \tag{1}$$

Здесь t_p^m – продолжительность выполнения m -й работы;

C – стоимость функционирования СЭ ОНКИ;

X_6 – множество, характеризующее параметры системы ТО,

$$X_6 = \{\vec{\tau}^{ТО}, \vec{v}^{ТО}\},$$

где $\vec{\tau}^{ТО}$ – вектор, характеризующий периодичность ТО ТлОб,

$$\vec{\tau}^{ТО} = [\tau_{1i}^{ТО}, \tau_{2i}^{ТО}, \dots, \tau_{mi}^{ТО}, \dots, \tau_{Mi}^{ТО}]^T,$$

где $\tau_{mi}^{ТО}$ – m -я периодичность ТО i -го вида ТлОб;

Mi – количество возможных периодичностей обслуживания i -го вида ТлОб;

$\vec{v}^{ТО}$ – вектор, характеризующий объем ТО ТлОб,

$$\vec{V}^{\text{ТО}} = [V_{1i}^{\text{ТО}}, V_{2i}^{\text{ТО}}, \dots, V_{mi}^{\text{ТО}}, \dots, V_{Mi}^{\text{ТО}}]^T,$$

где $V_{mi}^{\text{ТО}}$ – m -й объем ТО i -го вида ТлОб;

M_i – количество возможных объемов обслуживания i -го вида ТлОб.

Так как показатели t_p^m и C имеют стохастическую природу, то целесообразно перейти от (1) к установлению зависимости вероятности удовлетворения требований к продолжительности выполнения работ и к стоимости функционирования СЭ ОНКИ от параметров системы ТО, которая представлена в следующем виде:

$$P[t_p^1 \leq t_p^{mp}, \dots, t_p^M \leq t_p^{mp}, C \leq C^{mp}] = f(x_6). \quad (2)$$

Для решения задачи (2) была разработана модель функционирования СЭ ОНКИ, описанию которой посвящен следующий раздел.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ НАЗЕМНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Для моделирования СЭ ОНКИ было использовано агентное моделирование [10], так как анализ структуры СЭ ОНКИ выявил, что ее можно представить как совокупность однотипных элементов, таких как:

- работа, состоящая из операций $o = \overline{1, O}$, выполняемых в определенной последовательности;
- операции, выполняемые определенным набором систем $i = \overline{1, I}$;
- ЭОТН $k = \overline{1, K_{ij}}$, входящий в j -й тип i -й системы;
- комплект запасных частей, инструментов и принадлежностей (ЗИП), предусмотренный для каждой системы, участвующей в подготовке и пуске РКН Z_i , которые обладают определенным набором характеристик.

Исходя из этого, данные однотипные элементы удобно представить в виде агентов (классов), определенным образом взаимодействующих друг с другом, при этом отсутствует необходимость описывать поведение каждого элемента класса отдельно. Использование такого подхода позволит сэкономить затраты времени и вычислительных мощностей при моделировании.

На рис. 1 представлена агентная имитационная модель функционирования системы эксплуатации ОНКИ.

Входными данными для модели являются: $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6$.

Выходными данными для модели являются: $\vec{t}_p = [t_p^1, t_p^2, \dots, t_p^m, \dots, t_p^M]^T$ – вектор, характеризующий фактические продолжительности работ, где t_p^m – фактическая продолжительность m -й работы, и C – фактическая стоимость функционирования СЭ ОНКИ за период эксплуатации.

В процессе описания поведения ЭОТН моделируются следующие процессы: отказ ЭОТН, техническое обслуживание и восстановление ЭОТН.

Обнаружить отказавший ЭОТН возможно при проведении на нем ТО, так как проводится проверка на функционирование системы или в ходе выполнения работы, когда система задействована в проведении операции.

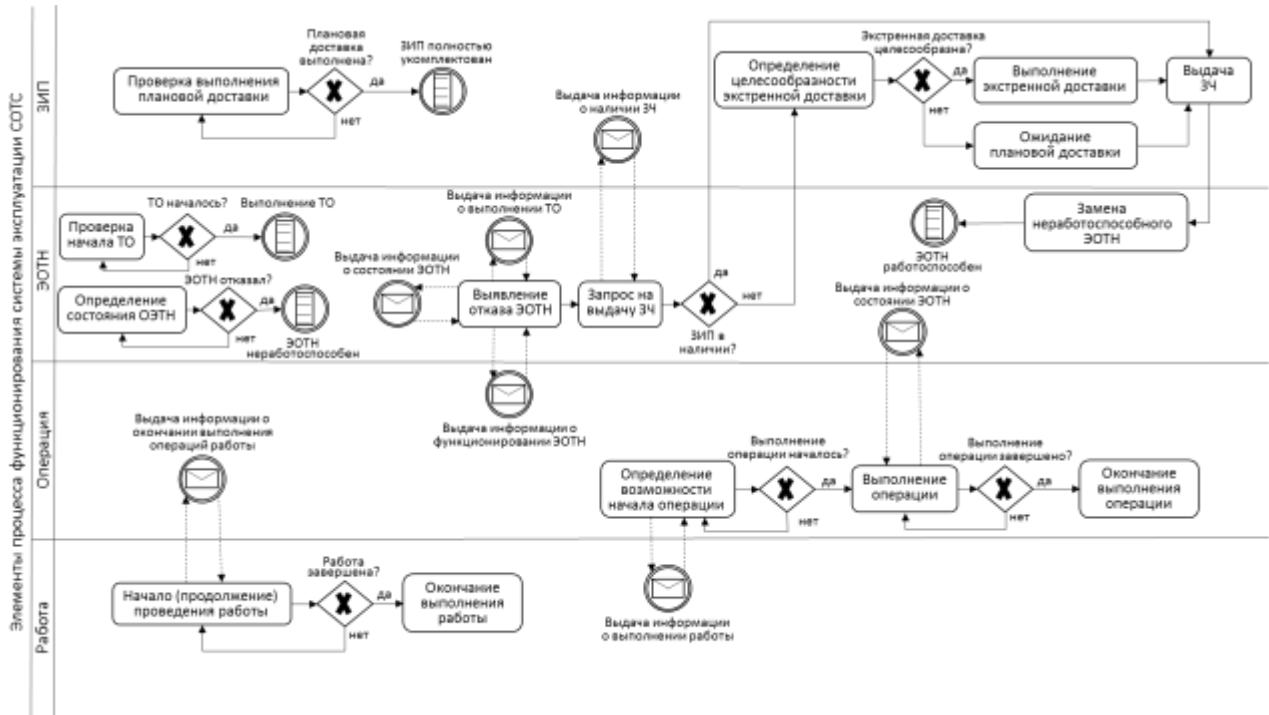


Рис. 1. Агентная имитационная модель функционирования системы эксплуатации ОНКИ

ТО проводится с целью контроля технического состояния для выявления отказов ТлОб и с целью проведения профилактических работ для увеличения ресурса ТлОб. Как известно, при эксплуатации ТлОб интенсивность отказа увеличивается, соответственно увеличивается и вероятность возникновения отказа. За счет проведения профилактических работ, например: замена масла, прокладок, смазка различных узлов и агрегатов, проверка затяжки различных креплений и т. д., увеличивается продолжительность эксплуатации ТлОб [11].

ТО моделируется в соответствии с заданной периодичностью и объемом. Они задаются индивидуально для каждого ТлОб, исходя из его особенностей. Объем ТО – это доля обслуживаемых ЭОТН от общего количества ЭОТН, входящих в ТлОб (рис. 2).



Рис. 2. Объем ТО технологического оборудования

Представим себе определенный вид технологического оборудования, в который входят десять ЭОТН. Для задания периодичности ТО все ЭОТН, входящие в ТлОб, ранжируются по уменьшению интенсивностей отказов λ_{ij} . Исходя из заданного объема ТО, определяются периодичности ТО для каждого ЭОТН.

Восстанавливается ЭОТН при условии наличия ЗЧ в комплекте ЗИП и истечении продолжительности устранения отказа $t_{устр}^{отк}$.

В процессе описания поведения комплекта ЗИП моделируются следующие процессы: плановое пополнение ЗЧ и экстренная доставка ЗЧ.

Плановое пополнение ЗЧ осуществляется в соответствии с заданной $\tau_{поп\ i}^{ЗИП}$. При выполнении плановой доставки комплект ЗИП каждой системы пополняется на количество израсходованных ЗЧ.

Экстренная доставка ЗЧ выполняется при обнаружении отказа во время проведения работ и отсутствии ЗЧ в комплекте ЗИП.

Условие, при котором необходимо выполнение экстренной доставки ЗЧ при обнаружении отказа ЭОТН на ТО, следующее:

$$t_{восст\ ij}^{ЭОТН} > t_{нач\ n}^p \quad (3)$$

Здесь $t_{восст\ ij}^{ЭОТН}$ – продолжительность восстановления ЭОТН j -го типа i -й системы,

$$t_{восст\ ij}^{ЭОТН} = t_{устр\ ij}^{отк} + \Delta,$$

где $t_{устр\ ij}^{отк}$ – продолжительность устранения отказа ЭОТН j -го типа i -й системы;

Δ – оставшееся время до пополнения комплекта ЗИП запасными частями в рамках плановой доставки,

$$\Delta = t_{поп} - t_{отк\ ij},$$

где $t_{поп}$ – время пополнения запасными частями комплекта ЗИП в рамках плановой доставки (рис. 3);

$t_{отк\ ij}$ – время наступления отказа ЭОТН j -го типа i -й системы;

$t_{нач\ n}^p$ – время начала выполнения ближайшей n -й работы.

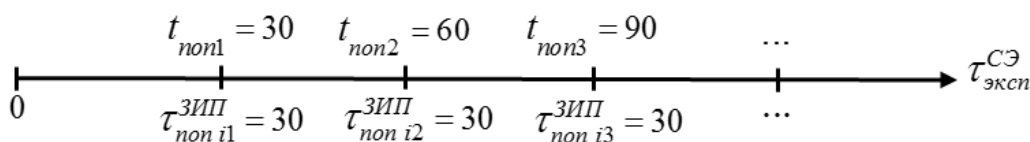


Рис. 3. Отличие времени пополнения ЗЧ комплекта ЗИП t_{non} от периодичности пополнения ЗЧ комплекта ЗИП $\tau_{non\ i}^{ЗИП}$

Если отказ обнаружен при проведении ТО и ЗЧ в комплекте ЗИП отсутствует, то экстренная доставка ЗЧ осуществляется в том случае, если при ожидании плановой доставки ЗЧ не удастся восстановить ЭОТН до начала выполнения работ (3). При выполнении экстренной доставки комплект ЗИП пополняется на количество израсходованных ЗЧ конкретного типа ЭОТН конкретной системы.

Если условие (3) не выполняется, то экстренная доставка не требуется.

В процессе описания поведения класса «Работа» моделируется процесс выполнения работы. Выполнение работы начинается в соответствии с планом проведения работ X_5 . Выполняемых работ может быть несколько, x_{5m} рассчитывается от начала моделирования СЭ ОНКИ. Модель работает таким образом, что следующая работа не может начаться, пока не закончится предыдущая работа.

Моделирование поведения такого элемента как «Операция» заключается в описании двух процессов: определения возможности начала операции и определения оценивания возможности ее окончания. Возможность начала операции определяется исходя из выполнения следующих условий: наступило время начала выполнения работы, все предшествующие операции завершены и ЭОТН ТлОб, задействованного в выполнении операции, исправны. В случае выявления неисправности на каком-либо ЭОТН время выполнения операции увеличивается на $t_{устр\ ij}^{отк}$, а в случае отсутствия ЗЧ в комплекте ЗИП еще и на $t_{экстр\ ij}^{доп}$. Операция будет окончена, когда время $t_{оп}$, отведенное на ее выполнение, станет равно 0. После выполнения всех операций работа считается завершённой.

Как говорилось выше, результатом моделирования явилось получение \vec{t}_p и C .

В результате моделирования такой подсистемы, как система ТО был предложен подход к формализации объема ТО, что позволило учесть комплексное влияние всех параметров системы ТО на показатели эффективности СЭ ОНКИ, а также при моделировании была учтена комплексность ее целей, что позволило оценить влияние параметров системы ТО на возможность достижения этих целей.

НАХОЖДЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ ДОСТИЖЕНИЯ КОМПЛЕКСА ЦЕЛЕЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ НАЗЕМНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Представим входные данные имитационной модели СЭ ОНКИ в виде вектора $\vec{r} = [X_1, X_2, X_3, X_4, X_5]^T$ и управляющих параметров, представленных в виде множества X_6 , выходные данные зададим в виде множества $W = \{t_p^1, t_p^2, \dots, t_p^m, \dots, t_p^M, C\}, m = \overline{1, M}$.

Если выходные параметры являются независимыми случайными величинами, то вероятность попадания значений показателей эффективности функционирования СЭ ОНКИ в область заданных требований вычисляется как

$$P[\{t_p^1, t_p^2, \dots, t_p^m, \dots, t_p^M, C\} \in \tilde{W}] = P_1[(t_p^1(\vec{r}, X_6) \in W_1)] \times \quad (4)$$

$$\times P_2[(t_p^2(\vec{r}, X_6) \in W_2)] \dots P_M[(t_p^M(\vec{r}, X_6) \in W_M)] P_c(C(\vec{r}, X_6) \in W)$$

Чтобы воспользоваться формулой (4), необходимо удостовериться в независимости случайных величин, для чего выполнить определенные действия, однако, если $M > 2$, то сложность выполнения существенно возрастает, о чем говорится в [12].

Поэтому рациональным способом вычисления P являются нахождение на основе обработки выборки выходных данных модели, полученных в результате имитационного моделирования функционирования СЭ ОНКИ, плотности вероятности системы случайных величин $f(t_p^1, t_p^2, \dots, t_p^m, \dots, t_p^M, C), m = \overline{1, M}$ и ее последующее M -кратное интегрирование:

$$P = P[\{t_p^1, t_p^2, \dots, t_p^m, \dots, t_p^M, C\} \in \tilde{W}] = \int \dots \int f(t_p^1, t_p^2, \dots, t_p^m, \dots, t_p^M, C) dt_p^1 \dots dt_p^M dC. \quad (5)$$

\tilde{W}

Для того чтобы найти плотность вероятности системы случайных величин, необходимо воспользоваться параметрическими или непараметрическими методами восстановления плотности вероятности.

Параметрические методы восстановления плотности вероятности описаны в работах [13–15], однако для функции плотности распределения системы случайных величин практически невозможно априорно выбрать соответствующий ей вид [13].

При рассмотрении непараметрических методов выяснилось, что для нахождения плотности вероятности $f(t_p^1, t_p^2, \dots, t_p^m, \dots, t_p^M, C), m = \overline{1, M}$ целесообразно воспользоваться или гистограммным методом [16–19], или ядерной оценкой плотности Парзена – Розенблатта [20–22], так как они нашли наибольшее применение.

Применение гистограммного метода для качественного восстановления плотности вероятности наиболее удобно в том случае, если имеется большое значение выборки исходных данных. В связи с данным недостатком для восстановления плотности вероятности рассмотрим метод ядерной оценки плотности вероятности.

Представим себе, что после проведения E вычислительных экспериментов в качестве выходных данных получили систему M случайных величин:

$$\{t_{pe}^1, t_{pe}^2, \dots, t_{pe}^m, \dots, t_{pe}^M, C_e\}, m = \overline{1, M}, e = \overline{1, E}. \quad (6)$$

Основой метода ядерной оценки плотности вероятности является нахождение плотности вероятности системы случайных величин при помощи выражения [22]

$$f(t_p^1, t_p^2, \dots, t_p^m, \dots, t_p^M, C) = \frac{1}{E} \sum_{e=1}^E \prod_{m=1}^M \frac{1}{h_m} Y\left(\frac{t_p^m - t_{pe}^m}{h_m}\right), \quad (7)$$

где t_{pe}^m – реализация продолжительности m -й работы в e -ом опыте;

h_m – ширина пропускания m -й случайной величины;

$Y\left(\frac{t_p^m - t_{pe}^m}{h_m}\right)$ – ядерная функция.

При вычислении ядерной оценки плотности вероятности очень важным является правильный выбор параметра h_m , так как он влияет на адекватность оценки плотности вероятности. При вычислении ядерной оценки плотности вероятности с помощью гауссовой ядерной функции значение h_m вычисляется по формуле Сильвермана [22]:

$$h_m = 0.9 A_m I^{-0.2}, \quad (8)$$

где A_m вычисляется по алгоритму, приведенному в [22].

Предложенный подход позволяет в результате обработки выходных данных моделирования оценить вероятность достижения целей.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Для того чтобы показать влияние параметров системы ТО на вероятность достижения цели, а именно своевременного выполнения работ, при функционировании СЭ ОНКИ необходимо провести вычислительный эксперимент с взятыми параметрами СЭ ОНКИ, которые представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Исходные данные для типа ЭОТН

Система	Номер типа ЭОТН, j	Номер системы, i	Количество ЭОТН, k	Интенсивность отказов, λ_{ij} [1/ч]	Продолжительность восстановления ЭОТН, $t_{\text{восст } ij}^{\text{ЭОТН}}$ [ч]	Начальное количество ЗЧ, z_{ijk} [шт.]	Продолжительность экстренной доставки, $t_{\text{дост } ij}^{\text{эстр}}$ [ч]
Система 1	1	0	6	0,000021	3	25	7
	2	0	3	0,000011	1	22	7
	3	0	8	0,000087	6	14	7
Система 2	1	1	17	0,000097	3	32	5
	2	1	15	0,000063	4	26	5
	3	1	20	0,000031	4	35	5
	4	1	5	0,000024	5	20	5
	5	1	12	0,000083	1	20	6
	6	1	10	0,000012	2	70	6
...
Система 20	1	19	2	0,000063	8	3	7
Система 1	1	100	20	5	1000	4000	7
	2	250	10	5	1000	4000	3
	3	1500	15	5	1000	4000	20
Система 2	1	300	4	3	600	2500	4
	2	150	10	3	600	2500	2
	3	230	7	3	600	2500	5
	4	1200	6	3	600	2500	6
	5	800	5	3	900	3000	8
	6	450	10	3	900	3000	3
...
Система 20	1	2100	19	15	1110	3950	17

Таблица 2

Исходные данные для операции

Номер проводимой операции	Номера предшествующих операций	Продолжительность операции, $t_{\text{оп}}$ [ч]	Номера систем, участвующих в проведении операции
0	-	0,25	1, 4
1	0	0,17	2, 6
...
41	40	0,33	3

Также заданы $\tau_{\text{эсп}}^{\text{СЭ}} = 8760$ ч, $t_{\text{р}}^{\text{ТР}} = 109$ ч, $C^{\text{ТР}} = 100000$ у. е., $\tau_{\text{поп}}^{\text{ЗИП}} = 4380$ ч.

После ввода исходных данных необходимо задаться переменными значениями объема ТО $V_{mi}^{\text{ТО}}$: ежемесячное и полугодовое техническое обслуживание варьируется от 0 до 100 % об-

служиваемых ЭОТН с интервалом 10 % обслуживаемых элементов, при годовом ТО обслуживается 100 % ЭОТН.

Для каждого сочетания значений объема ежемесячного и полугодового ТО было проведено моделирование, обработка результатов которого позволила получить плотность вероятности продолжительностей работ и стоимости функционирования СЭ ОНКИ $f(t_p^1, t_p^2, C)$.

Трехкратное интегрирование этой плотности позволило получить вероятность достижения комплекса целей:

$$P[t_p^1 \leq t_p^{TP}, \dots, t_p^2 \leq t_p^{TP}, C \leq C^{TP}].$$

В результате выполнения описанных выше операций был получен график зависимости вероятности достижения целей функционирования СЭ ОНКИ от значений объема ежемесячного и полугодового ТО (рис. 4).

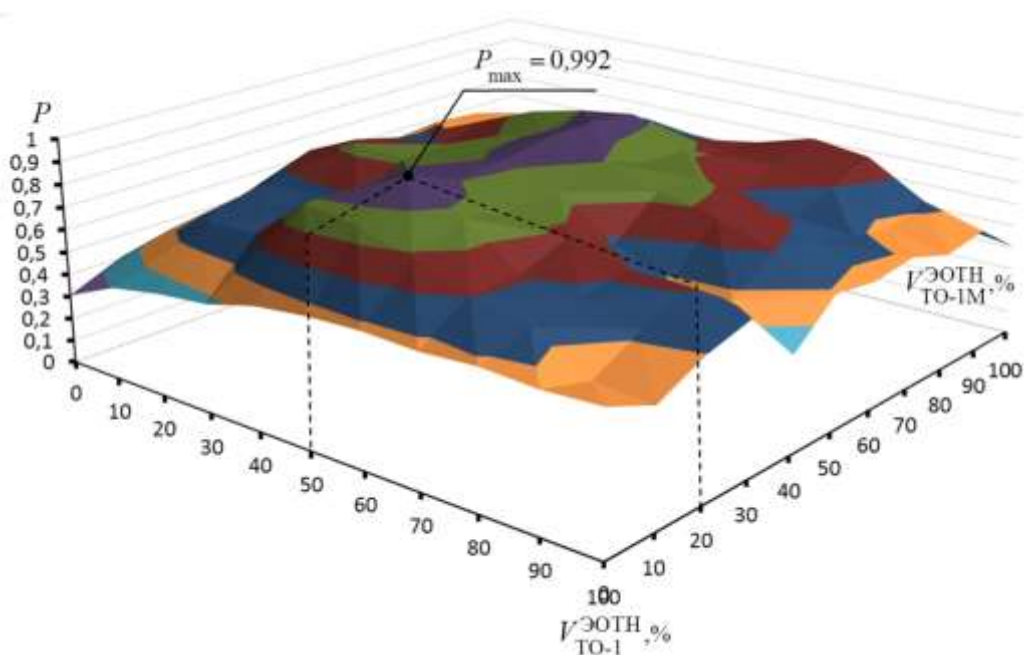


Рис. 4. График зависимости вероятности достижения целей функционирования СЭ ОНКИ от значений объема ежемесячного и полугодового ТО

Из представленного графика видно, что при максимальной вероятности достижения целей функционирования СЭ ОНКИ наиболее оптимальным является объем ТО со значениями $V_{ТО-1М}^{\text{ЭОТН}} = 50\%$, а $V_{ТО-1}^{\text{ЭОТН}} = 20\%$ обслуживаемых ЭОТН.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного анализа установлено, что для обоснования значений параметров системы ТО необходим научно-методический аппарат, в основе которого должна лежать модель функционирования СЭ ОНКИ, позволяющая установить связь показателей эффективности СЭ с параметрами системы ТО и со стоимостными показателями.

В разработанной агентной имитационной модели функционирования СЭ ОНКИ был предложен подход к формализации объема ТО, что позволило учесть комплексное влияние всех параметров системы ТО на показатели эффективности СЭ ОНКИ, а также при модели-

ровании была учтена комплексность ее целей, что позволило оценить влияние параметров системы ТО на возможность достижения этих целей.

Также для нахождения вероятности достижения комплекса целей функционирования СЭ ОНКИ был применен метод ядерной оценки плотности вероятности, который заключается в нахождении плотности вероятности системы случайных величин. В результате вычислительного эксперимента получена максимальная вероятность достижения комплекса целей функционирования СЭ ОНКИ при оптимальных значениях объема ежемесячного и полугодового ТО.

Список используемых источников

1. Дьяков А. Н., Кокарев А. С., Решетников Д. В. Моделирование системы эксплуатации технологического оборудования ракетно-космического комплекса // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2014. – Вып. 645. – С. 234–240.
2. Багаев Л. А., Еремин В. Н., Инютин С. А. Автоматизированное управление стратегиями обслуживания технических средств службы горючего // I-methods. – 2020. – Т. 12, № 3. – С. 1–10.
3. Федеральная космическая программа России на 2016 – 2025 годы : Постановление Правительства РФ № 230 от 23 марта 2016 г. – URL: <https://www.roscosmos.ru/22347/> (дата обращения: 27.08.2023).
4. Основы военно-технической политики Российской Федерации на период до 2025 года и дальнейшую перспективу : Указ Президента № 196с от 24 апреля 2016 г. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osnovnye-podhody-k-sozdaniyu-edinogo-informatsionnogo-prostranstva-voenno-tehnicheskoy-politiki-rossiyskoy-federatsii/viewer>. (дата обращения: 27.08.2023).
5. Основные направления развития ВВСТ на период до 2030 года : протокол № 11 от 26 декабря 2013 г., одобренный Военно-промышленной комиссией при Правительстве РФ. – URL: <https://base.garant.ru/70671940/> (дата обращения: 27.08.2023).
6. Дьяков А. Н., Кокарев А. С., Решетников Д. В. Методика выбора стратегий технического обслуживания и ремонта ракетно-космической техники // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2-2. – С. 24–27.
7. Модель технического обслуживания и ремонта пространственно распределенного объекта эксплуатации / А. Н. Дьяков [и др.] // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2022. – Вып. 682. – С. 183–192.
8. Дьяков А. Н., Кокарев А. С., Левчук А. А. Методика обоснования параметров системы технического обслуживания и ремонта передающего радиотехнического объекта // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2021. – Вып. 677. – С. 37–49.
9. Вивчарь Р. М., Пачин А. В., Решетников Д. В. Оценивание влияния интенсивности запусков космических аппаратов военного назначения на параметры системы обеспечения готовности ракеты космического назначения к пуску // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 671. – С. 246–253.
10. Николайчук О. Н., Павлов А. И., Юрин А. Ю. Система имитационного моделирования динамики состояний сложных технических систем на основе агентного подхода // Автоматизация в промышленности. – 2010. – № 7. – С. 45–49.
11. Nasa reliability-centered maintenance guide for facilities and collateral equipment. – NASA, 2008. – P. 472. – URL: <https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2023/06/nasa-rcmguide.pdf> (дата обращения: 27.08.2023).
12. Смирнов Н. В., Дунин-Барсковский И. В. Краткий курс математической статистики для технических приложений. – М. : Физматгиз, 1959. – 436 с.
13. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. – М. : Физматгиз, 1969. – 552 с.

14. Вивчарь Р. М., Решетников Д. В. Оценивание влияния параметров системы эксплуатации технологического оборудования ракетно-космического комплекса на вероятность выполнения технологической операции за заданное время // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 668. – С. 197–207.
15. Маслаков М. Л., Терновая А. К. Построение плотности распределения вероятностей КАМ сигналов // Цифровая обработка сигналов. – 2021. – № 3. – С. 36–40.
16. Акимов С. С., Трипкош В. А. Коэффициенты корректировки метода гистограмм для определения законов распределения вероятности // Научно-технический вестник Поволжья. – 2021. – № 10. – С. 15–17.
17. Сызранцев В. Н., Невелев Я. П., Голофаст С. Л. Адаптивные методы восстановления функции плотности распределения вероятности // Известия вузов. Машиностроение. – 2006. – № 12 – С. 3–11.
18. Шепель В. Н. Алгоритм определения эмпирической функции плотности $\hat{f}^{(n)}(x)$ по выборке из генеральной совокупности // Современные информационные технологии в науке и практике : материалы VIII Всероссийской научно-техн. конф. (с международным участием). – Оренбург : ИПК ГОУ ОГУ. – 2009. – С. 224–226.
19. Vanon G. Sur un estimateur non parametrique de la densite de probabilite // Revue de Statistique Appliquee. – 1976. – Vol. 24, № 4. – P. 61–73.
20. Давыдов В. С. Распознавание зарождающихся дефектов в узлах корабельных механизмов в результате вибродиагностирования на основе оптимальных решающих правил // Дефектоскопия. – 2019. – № 3. – С. 19–24.
21. Поршнев С. В., Копосов А. С. Использование аппроксимации Розенблатта – Парзена для восстановления функции распределения непрерывной случайной величины с ограниченным одномодальным законом распределения // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2013. – № 92. – С. 1–27.
22. Parzen E. On estimation of a probability density function and mode // Annals Mathematical Statistics. – 1962. – Vol. 33, № 3. – P. 1065–1076.

А. Е. Воронин,
кандидат технических наук;
Н. Е. Пешехонов,
кандидат технических наук, доцент;
Д. И. Порядин

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ МОДИФИЦИРОВАННОГО СИМПЛЕКС-МЕТОДА

Рассмотрена возможность применения симплекс-метода для целевой функции, у которой коэффициенты зависят от значения переменной. Предложен методический подход к решению задачи с нелинейной целевой функцией с использованием симплекс-метода, который можно применять в условиях, когда известны законы изменения коэффициентов целевой функции.

Ключевые слова: симплекс-метод, целевая функция, оптимизационная задача.

ВВЕДЕНИЕ

В электроэнергетике, как и в других областях целенаправленной человеческой деятельности, приходится часто встречаться с так называемыми оптимизационными задачами, когда нужно найти решение, предпочтительное с некоторой точки зрения. Задача оптимального развития энергосистем очень сложна. Она имеет высокую размерность. Многие зависимости между параметрами нелинейны. Особые трудности при поиске решения возникают из-за того, что некоторые искомые параметры являются дискретными.

В настоящее время методы решения нелинейных задач разработаны значительно хуже, чем методы линейного программирования, которые позволяют найти оптимальное решение при линейной целевой функции и линейных ограничениях. Многие методы решения нелинейных задач являются методами локального поиска, т. е. позволяют найти лишь локальный экстремум, причем число шагов, которое потребуется для его достижения, теоретически равно бесконечности. В то же время методы решения линейных оптимизационных задач хорошо разработаны и позволяют найти глобальный экстремум за конечное число шагов.

Применяемые методы линейного программирования представляют в основном различные модификации симплекс-метода. Суть этого метода заключается в отыскании оптимального решения путем перехода от одного допустимого решения к другому. Каждый такой переход (итерация) совершается не произвольно, а переход выполняется к такому допустимому решению, при котором целевая функция убывает наиболее существенно. При этом в симплекс-методе разработаны критерии, которые позволяют передвигаться «не вслепую», а всегда в направлении от худших решений к лучшим.

Предлагаемая модификация симплекс-метода основана на параметрическом программировании. В качестве параметра используются значения переменных на текущей итерации. Идея модификации метода состоит в том, что коэффициенты целевой функции уточняются на каждом шаге поиска решения и для определения вектора оценок используются промежуточные значения коэффициентов.

ЗАДАЧА ПОСТРОЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В самом общем случае задачу построения оптимальной структуры для сетей среднего напряжения (6–10 кВ) можно сформулировать в следующем виде: для заданных мест размещения сетевой понизительной подстанции (СПП) и трансформаторных подстанций (ТП)

спроектировать линии электропередачи (ЛЭП) для электроснабжения ТП с наименьшими годовыми приведенными затратами. На рис. 1 представлена структура системы электропитания, на которой кружками обозначены трансформаторные подстанции, пунктирными линиями возможные ЛЭП и протекающие по ним мощности P_i . Требуемую мощность ТП обозначим P_{pi} . В дальнейшем необходимо учесть, что на специальных объектах распределение электроэнергии осуществляется кабельными линиями электропередач (КЛЭП).

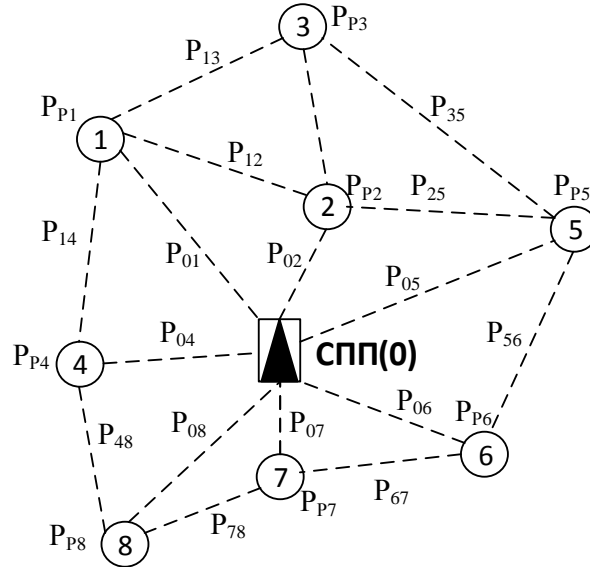


Рис. 1. Структура системы электропитания

Целевая функция будет иметь следующий вид:

$$Z = \sum_1^N Z_i, \quad (1)$$

где Z – годовые приведенные затраты на все линии электропередачи;
 Z_i – годовые приведенные затраты на i -ю линию электропередачи.

Затраты на линию электропередачи можно определить по укрупненным сметным нормам, используя следующее выражение:

$$Z_i = p_{\Sigma} \cdot (A + B \cdot F) \cdot L, \quad (2)$$

где p_{Σ} – суммарный коэффициент отчислений (справочная величина);
 A, B – справочные коэффициенты, зависящие от напряжения и вида КЛЭП;
 F – сечение КЛЭП, зависящее от передаваемой мощности;
 L – длина КЛЭП, которая является постоянной величиной и определяется расположением ТП.

Каноническая форма записи невырожденной задачи линейного программирования имеет вид

$$\begin{cases} Z = C_1 \cdot P_1 + C_2 \cdot P_2 + \dots + C_i \cdot P_i + C_n \cdot P_n + \dots + C_N \cdot P_N; \\ a_{11} \cdot P_1 + a_{12} \cdot P_2 + \dots + a_{1i} \cdot P_i + a_{1n} \cdot P_n + \dots + a_{1N} \cdot P_N = P_{p1}; \\ a_{21} \cdot P_1 + a_{22} \cdot P_2 + \dots + a_{2i} \cdot P_i + a_{2n} \cdot P_n + \dots + a_{2N} \cdot P_N = P_{p2}; \\ \dots \\ a_{j1} \cdot P_1 + a_{j2} \cdot P_2 + \dots + a_{ji} \cdot P_i + a_{jn} \cdot P_n + \dots + a_{jN} \cdot P_N = P_{pj}; \\ \dots \\ a_{M1} \cdot P_1 + a_{M2} \cdot P_2 + \dots + a_{Mi} \cdot P_i + a_{Mn} \cdot P_n + \dots + a_{MN} \cdot P_N = P_{pM}; \end{cases} \quad (3)$$

где M – общее количество узлов (ТП), для которых составляются уравнения ограничения (баланс мощностей на j -й ТП);
 P_i – мощность, передаваемая через i -ю КЛЭП;
 a_{ji} – коэффициент, показывающий направление передаваемой мощности и участие i -й КЛЭП в балансовом уравнении узла,

$$a_{ji} = \{-1, 0, 1\}.$$

Здесь коэффициент a_{ji} принимает значения:

- 1) -1 , если мощность передается от j -го узла к другой ТП;
- 2) 0 , если i -я КЛЭП не участвует в передаче мощности для j -го узла;
- 3) 1 , если мощность передается от другой ТП в j -й узел.

В зависимости от вида получаемых решений задачи линейного программирования разделяются на вырожденные и невырожденные.

Невырожденность задачи линейного программирования означает, что решение содержит столько же отличных от нуля переменных, сколько уравнений ограничений в задаче. В рассматриваемом случае задача является невырожденной, так как любой из рассматриваемых узлов должен получить питание от СПП или от другой ТП. Это означает, что в соответствующем балансовом уравнении хотя бы одна переменная отлична от нуля. Балансовые уравнения будут показывать баланс мощностей в узлах. Если в ходе решения задачи значение мощности будет отрицательным, значит направление передачи мощности в данной КЛЭП противоположно принятому.

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ СИМПЛЕКС-МЕТОД

В выражении (2) заменим сечение КЛЭП на передаваемую мощность и учтем эту замену в коэффициенте $B(B^t)$, так как сечение пропорционально передаваемой мощности, ступенчатым изменением сечения на данном этапе пренебрежем. Определим выражение для коэффициента целевой функции:

$$p_{\Sigma} \cdot (A + B^t \cdot P_i) \cdot L = C_i \cdot P_i, \quad (4)$$

тогда

$$C_i = \frac{p_{\Sigma} \cdot (A + B^t \cdot P_i) \cdot L}{P_i}. \quad (5)$$

Таким образом, коэффициенты целевой функции нелинейны и зависят от передаваемой мощности.

Нулевое допустимое решение задачи называется ее опорным решением, при этом координаты вектора решения должны составлять линейно независимую систему. На основании системы уравнений (1) составляется полная симплекс-таблица (табл. 1).

Базисными переменными в теории линейного программирования принято называть отличные от нуля переменные данного опорного решения.

В симплекс-таблице (табл. 1) приняты следующие обозначения:

P_j^B – базисные, отличные от нуля значения переменных для данного решения;

C_j^B – значения коэффициентов целевой функции, определенные для базисных переменных (P_j^B);

C_i – значения коэффициентов целевой функции, определяемые по следующему правилу: если переменная, которой соответствует коэффициент целевой функции, является базисной, то $C_i = f(P_i)$, если переменная не базисная, то расчетное значение коэффициента целевой

функции определяется из условия возможного изменения небазисной переменной на следующей итерации на максимально возможное значение, т. е. $C_i = f(P_i + \Delta P_i)$;

Z – значение целевой функции, $Z = C_1^B \cdot P_1 + C_2^B \cdot P_2 + \dots + C_N^B \cdot P_N$;

ΔZ_i – оценка векторов P_i для данного базиса, определяемая по формуле

$$\Delta Z_i = \sum_{j=1}^n C_j^B - C_i.$$

Таблица 1

Исходная симплекс-таблица модифицированного симплекс-метода

№ п/п	Базисные переменные	Коэффициенты целевой функции у базисной пере- менной	Свободные члены уравнений ограниче- ний	Переменные и значения коэффициентов целевой функции					
				P_1	...	P_i	P_n	...	P_N
				C_1	...	C_i	C_n	...	C_N
1	P_1^B	C_1^B	P_{p1}	1	...	0	0	...	0
2	P_2^B	C_2^B	P_{p2}	0	...	-1	0	...	0
...
j	P_j^B	C_j^B	P_{pj}	0	...	0	1	...	0
...
n	P_n^B	C_n^B	P_{pn}	0	...	0	0	...	1
Z				ΔZ_1	...	ΔZ_i	ΔZ_n	...	ΔZ_N

Оценка вектора и значение целевой функции определяются после составления симплекс-таблицы. Необходимое и достаточное условие оптимальности данного опорного решения определено следующей теоремой: если для данного опорного решения оценки вектора ΔZ_i неположительные (для задач минимизации), то это решение является оптимальным. Пусть ΔP_i^{\max} – максимально возможное изменение переменной P_i за одну итерацию, тогда значение коэффициента $C_i(P_i + \Delta P_i^{\max})$ будет минимально возможным на следующей итерации.

В этом случае справедливо

$$C_i = (P_i + \Delta P_i^{\max}) \leq C_i(P_i + \Delta P_i), \quad (6)$$

где ΔP_i – любое возможное изменение переменной P_i , ($\Delta P_i \leq \Delta P_i^{\max}$).

Выражение (3) для оценки вектора ΔZ_i с учетом условия оптимальности можно представить в следующем виде:

$$\sum_{j=1}^n C_j^B - C_i \leq 0. \quad (7)$$

Если выражение справедливо при $C_i(P_i \leq \Delta P_i)$, то, в силу выражения (6), оно будет справедливым и при $C_i(P_i + \Delta P_i^{\max})$, а это является необходимым и достаточным условием оптимальности данного решения.

Если данное опорное решение не является оптимальным, производится переход к следующему опорному решению. Определяется индекс небазисной переменной, вводимой в базис на следующей итерации, $s = i$. В силу того, что для каждого решения количество отличных

от нуля переменных равно, необходимо определить индекс выводимой из базиса переменной (r).

Для этого определим для всех $a_{js} \neq 0$ отношение

$$\forall j = \overline{1, n} \frac{P_{pj}}{a_{js}}. \tag{8}$$

Индекс выводимой переменной (r) соответствует наименьшему значению (8). На следующем шаге необходимо произвести пересчет симплекс-таблицы по правилу «крест-накрест». Порядок пересчета и вводимая и выводимая переменные показаны в табл. 2.

Таблица 2

Порядок пересчета элементов симплекс-таблицы

№ п/п	Базисные переменные	Коэффициенты целевой функции у базисной переменной	Свободные члены уравнений ограничений	Переменные и значения коэффициентов целевой функции					
				P_1	...	P_i	P_n	...	P_N
				C_1	...	C_i	C_n	...	C_N
1	P_1^B	C_1^B	P_{p1} P_{p1}^*	a_{11} a_{11}^*	...	a_{1i} a_{1i}^*	a_{1n} $a_{1i}^* = \frac{a_{j1}}{a_{in}}$	...	a_{1N} a_{1N}^*
2	P_2^B	C_2^B	P_{p2} P_{p2}^*	a_{21} a_{21}^*	...	a_{2i} a_{2i}^*	a_{2n} $a_{2n}^* = 0$	...	a_{2N} a_{2N}^*
\leftarrow r	P_1^B	P_1^B	P_1^B	P_1^B	P_1^B	P_1^B	P_1^B	P_1^B	P_1^B
j	P_j^B	C_j^B	P_{pj} P_{pj}^*	a_{j1} $a_{j1}^* = \frac{a_{j1}}{a_{in}}$	...	a_{ji} $a_{j1}^* = \frac{a_{j1}}{a_{in}}$	a_{jn} $1 = \frac{a_{in}}{a_{in}}$	...	a_{jN} $a_{jN}^* = \frac{a_{jN}}{a_{in}}$
...
n	P_n^B	C_n^B	P_{pn} P_{pn}^*	a_{n1} a_{n1}^*	...	a_{ni} a_{n1}^*	a_{nn} $a_{nn}^* = 0$	...	a_{nN} a_{nN}^*
$Z = \sum_{j=1}^n C_j^B \cdot P_j^B$				ΔZ_1	...	ΔZ_i	ΔZ_n	...	ΔZ_N



Для элементов столбца вводимой в базис переменной

$$a_{js}^* = 0, \forall j \neq r. \tag{9}$$

В выражении (9) символом «*» обозначены новые элементы симплекс-таблицы.

Для узловой точки ($i = s, j = r$)

$$a_{js}^* = 1. \tag{10}$$

Для строки переменной вводимой из базиса

$$\forall r \neq s \cup j = r, a_{ri}^* = \frac{a_{ri}}{a_{rs}}. \quad (11)$$

Все остальные элементы, включая столбец свободных членов, определяются выражением

$$\forall j = r \cup i \neq s, a_{ji}^* = a_{ji} \cdot a_{rs}^* - a_{ri}^* \cdot a_{js}. \quad (12)$$

Элементы диагонали перемножаются (причем в ведущей $j = r$ строке используется новое значение), и из этого произведения вычитается произведение элементов второй диагонали (причем в соответствующей клетке ведущей строки снова берется новое значение a_{ri}^*).

После определения всех элементов симплекс-таблицы вновь производится пересчет оценок вектора ΔZ_i и проверка оптимальности данного опорного решения. При невыполнении этого условия производится переход к следующей итерации.

Рассмотренная модификация симплекс-метода позволяет, используя аппарат линейного программирования, оптимизировать целевую функцию с параметрически заданными коэффициентами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Авторами предложен математический аппарат решения задачи построения оптимальной структуры систем электроснабжения для сетей среднего напряжения, который можно применять в условиях, когда сечение кабельных линий не изменяется или изменяется в небольших диапазонах. Использование данного метода показало его эффективность, а именно решение задач небольшой размерности (не более 20 ТП) дает полное совпадение с другими методами, так как диапазон изменения передаваемой мощности по линиям небольшой.

Данный метод может быть рекомендован для предварительного построения структуры СЭС с последующим уточнением ее по другим критериям.

Список используемых источников

1. *Костин В. Н.* Оптимизационные задачи электроэнергетики : учеб. пособие. – СПб. : СЗТУ, 2003 – 120 с.
2. *Шадрина Н. И.* Решение задач оптимизации в Microsoft Excel : учеб. пособие. – Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2016. – 101 с.
3. *Болотникова О. В., Тарасов Д. В., Тарасов Р. В.* Линейное программирование: симплекс-метод и двойственность : учеб. пособие. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2015 – 84 с.
4. *Леонова Н. Л.* Задачи линейного программирования и методы их решения : учебно-методическое пособие. – СПб. : ВШТЭ СПбГУПТД, 2017. – 75 с.

С. Ю. Герасименко,
кандидат технических наук;
В. М. Низовцев,
кандидат технических наук, доцент;
А. И. Петухов

МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА ПРОЦЕССОВ ОБТЕКАНИЯ ПРОФИЛИРОВАННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ТЕПЛООБМЕННЫХ УСТРОЙСТВ И СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПОТОКОМ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ

Рассматривается обтекание профилированных поверхностей элементов конструкции систем охлаждения газотурбинных двигателей (ГТД) и теплообменных устройств систем летательных аппаратов (ЛА) потоком вязкой несжимаемой жидкости. Интегрирование уравнений движения вязкой жидкости – уравнений Навье – Стокса, осуществляется численным конечноразностным методом. Выполнено расчетно-теоретическое исследование влияния параметров потока жидкости на распределение давления и трения вдоль поверхности профиля и на изменение скорости в потоке. Установлено, что в этих условиях при обтекании заостренной кромки профилированной поверхности в несколько раз снижается давление торможения потока жидкости. Это приводит к снижению сопротивления давления и общего сопротивления, а также к уменьшению гидравлического сопротивления в каналах с развитыми поверхностями теплообмена в системах ЛА и ГТД. Разработана экономичная методика численного расчета процессов обтекания профилированных поверхностей с криволинейной образующей потоком вязкой несжимаемой жидкости. Показано, что благодаря использованию профилей с заостренной передней кромкой могут быть существенно уменьшены затраты мощности энергетической установки (ЭУ) и ГТД ЛА на прокачку охлаждающей жидкости (теплоносителя).

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, профилированная поверхность, летательный аппарат, поток вязкой жидкости, расчетно-теоретическое численное исследование.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время практика проектирования и эксплуатации систем летательных аппаратов выдвигает задачи, связанные с расчетом обтекания профилированных конструктивных элементов систем охлаждения газотурбинных двигателей, энергетических установок, теплообменных устройств систем обеспечения теплового режима (СОТР) потоком вязкой несжимаемой жидкости [1–4]. Численное решение таких задач оказывается сложным, так как применение для описания течений жидкости уравнений пограничного слоя требует, чтобы краевые условия на его границе были известны заранее, и не позволяет определять параметры потока вблизи особых (критических) точек. Не дает возможности найти выход из положения и объединение двух математических моделей – уравнений движения невязкого газа Л. Эйлера и уравнений пограничного слоя. Поэтому возникает необходимость выполнять подобные расчеты на основе системы уравнений движения Навье – Стокса [3, 5, 6].

В статье приведены результаты расчетно-теоретического исследования процесса обтекания плоского симметричного тонкого профиля ламинарным потоком вязкой несжимаемой жидкости. Задача решалась в двухмерной постановке.

На рис. 1 представлена физическая модель с расчетной схемой процесса. При формировании физической модели использовались следующие основные допущения:

- 1) процессы теплообмена между жидкостью и материалом стенки профиля не учитывались;
- 2) рассматривалось обтекание профиля при нулевом значении угла атаки;
- 3) физико-механические свойства жидкости принимались постоянными;
- 4) гравитационные силы не учитывались.

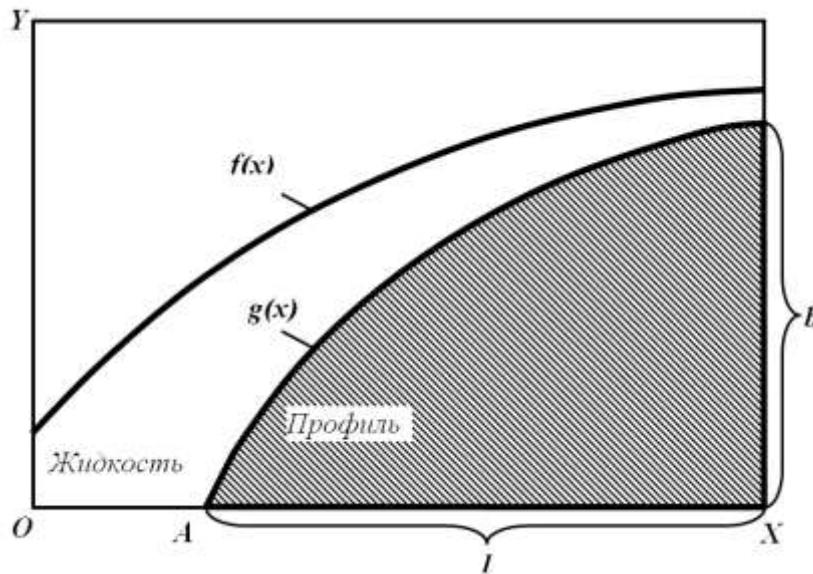


Рис. 1. Физическая модель с расчетной схемой обтекания профиля потоком жидкости

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Выбранной физической модели процесса обтекания профиля потоком вязкой несжимаемой жидкости с учетом сформулированных допущений соответствует следующая система дифференциальных уравнений в частных производных [5]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right); \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right); \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0. \quad (3)$$

Уравнения (1) – (3) интегрируются при следующих начальных условиях, $t = 0$:

$$u(x, y, t) = u_0; v(x, y, t) = 0; p(x, y, t) = p_\infty. \quad (4)$$

Граничные условия:

– при $x = 0$

$$u(x, y, t) = u_\infty; v(x, y, t) = 0; p(x, y, t) = p_\infty; \quad (5)$$

– при $x = l + l_0$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = 0; \quad (6)$$

– при $y = 0$ $l_0 \leq x \leq l + l_0$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}; u(x, y, t) = v(x, y, t) = 0; \quad (7)$$

– при $y = 0$ $0 \leq x \leq l_0$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial p}{\partial y} = \nu(x, y, t) = 0; \quad (8)$$

– при $y = h$ $0 \leq x \leq l+l_0$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial \nu}{\partial y} = \frac{\partial p}{\partial y} = 0. \quad (9)$$

В представленной математической модели использованы следующие обозначения: $u(x, y, t)$, $v(x, y, t)$ – поля проекций вектора скорости на оси координат ox , oy ; $p(x, y, t)$ – поле давления жидкости; ρ – плотность жидкости; ν – кинематический коэффициент вязкости жидкости при заданной температуре; l_0 – расстояние от левой границы рассматриваемой области до передней кромки профиля; l – длина (хорда) профиля; h – поперечный размер рассматриваемой области; b – толщина профиля; t – время.

Математическая модель включает: уравнения сохранения импульса жидкости в проекции на оси ox и oy (1), (2); уравнение неразрывности (3); начальные и граничные условия (4)–(9).

Уравнения (1) и (2) содержат производные по времени и могут быть решены для переменных величин u , v при помощи конечно-разностного метода дробных шагов [7–9]. Давление p оказывается неявным. Если рассматривать установившееся течение жидкости, то точный вид процесса установления не имеет большого значения. Это обстоятельство используется в работах [7, 10], где предлагается видоизменить уравнение неразрывности путем введения в него производной по времени или совсем заменить его специальным уравнением (типа уравнения Пуассона) для давления, которое можно получить, комбинируя уравнения (1)–(3).

В таком случае решение полученной системы уравнений определяется в области, представленной на рис. 1, где $f = f(x)$ – функция для задания верхней границы области, $g = g(x)$ – функция для задания границы профиля, OA – линия торможения. Вид функций $f(x)$ и $g(x)$ довольно произволен, они могут иметь и слабые разрывы.

Решение видоизмененной системы уравнений (1)–(3) в прямоугольных декартовых координатах сопряжено с определенными трудностями, вызванными ограниченными возможностями ПЭВМ и необходимостью использовать несогласованную сетку. Последнее требует интерполирования вблизи границы профиля и верхней границы области (см. рис. 1), что в значительной мере усложняет получение устойчивого решения [10].

Численное решение может быть найдено благодаря применению такого преобразования координат, которое бы трансформировало область с криволинейными границами в прямоугольную область. Подобное преобразование используется в работе [9]. Перейдем от системы координат (x, y) к системе (ξ, η) . Причем справедливы зависимости $\xi = x$; $\eta = \eta(x, y)$, где функция $\eta(x, y)$ удовлетворяет условиям: $\eta[x, g(x)] = 0$; $\eta[x, f(x)] = h$. Наиболее простой вид приобретает замена переменных, если воспользоваться соотношением

$$\eta = h \frac{y - g(x)}{f(x) - g(x)}.$$

После замены переменных область численного решения определяется неравенствами:

$$0 \leq \xi \leq l+l_0; \quad 0 \leq \eta \leq h.$$

В новых переменных уравнения (1)–(3) приобретают вид:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial \xi} + (\nu k - Fu + \nu c) \frac{\partial u}{\partial \eta} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial \xi} - F \frac{\partial p}{\partial \eta} \right) + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} - B \frac{\partial^2 u}{\partial \xi \partial \eta} + [A + k^2] \frac{\partial^2 u}{\partial \eta^2} \right); \quad (10)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial \xi} + (vk - Fu + vc) \frac{\partial v}{\partial \eta} = -\frac{1}{\rho} k \frac{\partial p}{\partial \eta} + v \left(\frac{\partial^2 v}{\partial \xi^2} - B \frac{\partial^2 v}{\partial \xi \partial \eta} + [A + k^2] \frac{\partial^2 v}{\partial \eta^2} \right); \quad (11)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \xi} - F \frac{\partial u}{\partial \eta} + k \frac{\partial v}{\partial \eta} = 0; \quad (12)$$

где

$$F = F(\xi, \eta) = -\frac{\partial \eta}{\partial x} = h \left[\frac{g' + \eta(f' - g')/h}{f - g} \right];$$

$$A = [F(\xi, \eta)]^2; \quad B = 2F(\xi, \eta); \quad c = \frac{\partial F}{\partial \xi} - F \frac{\partial F}{\partial \eta}; \quad k = \frac{h}{f - g}.$$

Полученные уравнения интегрировались численно в прямоугольной области, что позволило применить метод дробных шагов для расчета обтекания профилированной поверхности потоком вязкой (несжимаемой) жидкости [7, 11].

Система дифференциальных уравнений в частных производных (10)–(12) с уравнением для давления, с начальными и граничными условиями (4)–(9) и с учетом выполненных преобразований решалась численно. Для интегрирования дифференциальных уравнений применялись разностные схемы переменных направлений [8, 9]. В уравнениях (10) и (11) использовалась неявно-явная схема с трехточечной разностной формулой для вторых производных и с четырехточечной формулой для смешанных производных. Поэтому применяемые разностные схемы сводятся к трехточечным прогонкам вдоль линий прямоугольной сетки, параллельных осям координат $o\xi, o\eta$ на каждом полушаге по времени $\Delta t/2$.

Неизвестные параметры на границах области рассчитывались экстраполяцией по их значениям во внутренних узлах разностной сетки и с помощью формул численного дифференцирования, аппроксимирующих дифференциальные граничные условия (6)–(9) [10].

Для решения разностных уравнений применялась сетка с переменными шагами вдоль координатных осей ξ, η со сгущением в направлении к передней критической точке профиля (см. рис. 1).

Шаг по времени Δt рассчитывался с использованием критерия Куранта $\Delta t < \Delta x/u_{\max}$ или критерия вида $\Delta t \leq r(\Delta y)^2/2v$, где $r = 0,6 - 0,7$ [8, 9]. Для повышения устойчивости вычислительного алгоритма использовалась разностная схема пересчета и локально применялась нелинейная форма искусственной вязкости [8, 12]. Контроль точности численного решения выполнялся путем сравнения с имеющимися аналитическими решениями модельных задач и на основе проверки ошибки по выполнению закона сохранения массы. Выполнено также качественное сравнение распределения давления, полученного в расчетах, с экспериментальными данными других авторов для профилей с аналогичной геометрией [5, 13, 14].

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Разработанный вычислительный алгоритм был использован для определения гидродинамических параметров при обтекании плоских профилированных поверхностей потоком вязкой несжимаемой жидкости (газа).

Проведены численные расчеты на ПЭВМ. Были сформированы следующие исходные данные: числа Рейнольдса $Re = \leq 10^5$; $l = 0,04 - 0,1$ м. Толщина профиля составляла 0,01–0,03 м. Размер расчетной области h в направлении оси ou в 5–10 раз превышал толщину приповерхностного пограничного слоя. Приняты следующие значения параметров основного

потока: скорость $u_\infty = 0,1-2,5$ м/с; $p_\infty = 10^5$ Па. Физические свойства жидкости аналогичны свойствам воды или воздуха [8, 14]. Граница профиля и верхняя граница области численного решения задавались параболой вида $y = -ax^2 + b$.

Полученные результаты расчетов приведены на рис. 2–4.

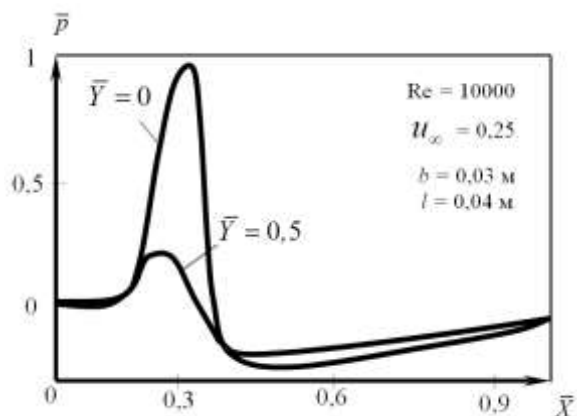


Рис. 2. Распределение коэффициента давления вдоль оси OX

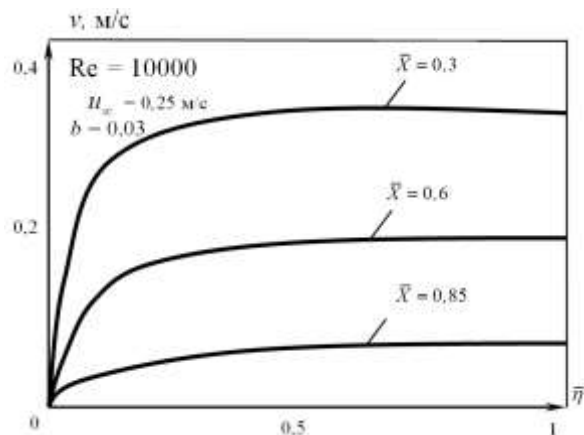


Рис. 3. Распределение нормальной скорости v в различных сечениях потока на поверхности профиля

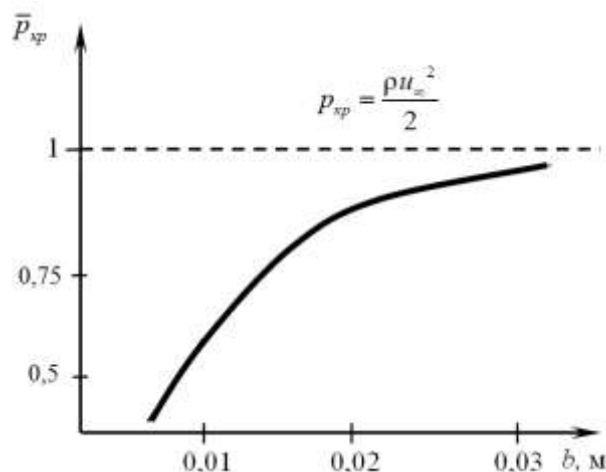


Рис. 4. Зависимость коэффициента давления в передней критической точке от максимальной толщины профиля

Анализ полученных результатов позволяет сформулировать следующие выводы.

1. При расчете течения во входных ячейках сетки ошибка в вычислении скорости приводит к потере массы величиной до 5%.
2. Распределение давления вдоль поверхности профиля, полученное в расчете, качественно правильно отражает экспериментальные данные других авторов для аналогичных условий [3, 5].
3. Разработанная методика позволяет получить установившееся численное решение задачи расчета обтекания профиля потоком вязкой жидкости.
4. Рассчитанные распределения скоростей и давления качественно правильно отражают физическую модель явления [5].
5. Поперечная составляющая скорости v в окрестности критической точки возрастает и по порядку величины становится сравнимой с продольной скоростью u .

6. Наклон полного вектора скорости к оси OX довольно точно соответствует наклону касательной к контуру профиля в одноименных точках.

7. Распределение напряжения трения качественно правильно отражает исследуемое явление.

8. С увеличением толщины профиля b давление в передней критической точке возрастает и асимптотически стремится к величине давления торможения, определенного по уравнению энергии для потока несжимаемой жидкости. Это означает, что с уменьшением толщины профиля с заостренной передней кромкой возможно более чем в 2 раза снизить сопротивление давления потоку жидкости, а также и сопротивление трения (на 15–20%). В результате уменьшится и общее гидравлическое сопротивление развитой поверхности теплообмена, составленной из таких профилированных пластин и применяемой, например, в системах охлаждения газотурбинных и реактивных двигателей летательных аппаратов, а также в системах обеспечения теплового режима летательных аппаратов [1, 2, 13].

9. Применение профилированных пластин в конструкции теплообменных поверхностей позволяет улучшить массовые характеристики ГТД и СОТР ЛА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные математические модели и численная схема переменных направлений, основанные на методе дробных шагов, были применены к расчету симметричного обтекания плоского тонкого профиля с острой передней кромкой ламинарным потоком вязкой несжимаемой жидкости. Полученные результаты показывают, что этот метод достаточно экономичен и может использоваться для расчета параметров течения в областях с произвольными криволинейными границами при условии, что введено соответствующее преобразование координат. Установлено, что в этих условиях при обтекании заостренной кромки профилированной поверхности более чем в 2 раза снижается давление торможения потока жидкости. Это приводит к снижению сопротивления давления и общего сопротивления, а также к уменьшению гидравлического сопротивления, например в каналах с развитыми поверхностями теплообмена в системах ЛА, что подтверждается экспериментальными данными, приведенными в работах [11, 13].

Применение данного метода возможно в широком диапазоне чисел Рейнольдса, не превышающего 10^6 . В остальных случаях требуются дополнительные исследования. Предложенный метод может быть использован также для расчета обтекания управляющих и несущих поверхностей летательных аппаратов потоком вязкого несжимаемого газа [3, 5].

Список используемых источников

1. *Добровольский М. В.* Жидкостные ракетные двигатели. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. – 461 с.
2. *Казанджан П. К., Тихонов Н. Д., Янко А. К.* Теория авиационных двигателей. Теория лопаточных машин : учебник / под ред. П. К. Казанджана. – М. : Машиностроение, 1983. – 217 с.
3. Математическое моделирование тепловых и газодинамических процессов при проектировании летательных аппаратов / В. В. Горский [и др.]; под ред. В. В. Горского. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. – 212 с.
4. *Гюлайлиа А., Харси А., Хамиду М. К.* Моделирование эффективности пленочного охлаждения передней кромки лопатки через профилированные сужающиеся отверстия // Теплофизика и аэромеханика. – 2016. – Т. 23, № 1. – С. 33–44.
5. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя. – М. : Наука, 1974. – 711 с.

6. Взаимодействие газочапельной турбулентной струи и спутного скоростного высокотемпературного потока газа / Д. В. Садин [и др.] // Прикладная механика и техническая физика. – 2008. – Т. 49, № 3. – С. 85–94.
7. Яненко Н. Н. Метод дробных шагов решения многомерных задач математической физики. – Новосибирск : Наука, 1967. – 195 с.
8. Самарский А. А. Теория разностных схем. – М. : Наука, 1983. – 421 с.
9. Годунов С. К., Рябенкий В. С. Разностные схемы (введение в теорию) : учеб. пособие. – М. : Наука, 1977. – 440 с.
10. Разностные схемы в задачах газовой динамики на неструктурированных сетках / под ред. проф. В. Н. Емельянова, д-ра физ.-мат. наук К. Н. Волкова. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 416 с.
11. Волков К. Н., Емельянов В. Н. Газовые течения с массоподводом в каналах и трактах энергоустановок. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 464 с.
12. Садин Д. В. О жесткости систем уравнений в частных производных, описывающих движения гетерогенных сред // Математическое моделирование. – 2002. – Т. 14, № 11. – С. 43–53.
13. Результаты лабораторного моделирования процессов интенсификации конвективного теплообмена и определения гидравлического сопротивления в системах охлаждения элементов конструкции реактивных двигателей летательных аппаратов / С. Ю. Герасименко [и др.] // Сборник статей III Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы создания и применения космических аппаратов и систем средств выведения в интересах решения задач Вооруженных Сил Российской Федерации». – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2022. – С. 140–146.
14. Ройзен Л. И., Дулькин И. Н. Тепловой расчет ребренных поверхностей / под ред. В. Г. Фастовского. – М. : Энергия, 1977. – 254 с.

Л. К. Горшков,
доктор технических наук, профессор;
Е. Л. Лебедев,
доктор технических наук, профессор;
К. В. Румянцев*

*АО «Корпорация «Стратегические пункты управления», г. Москва.

МОДЕЛЬ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В ПЛАСТИЧЕСКИ ДЕФОРМИРУЕМЫХ ЭЛЕМЕНТАХ ДЕМПФИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ

В работе представлена модель напряженно-деформированного состояния в пластически деформируемых элементах демпфирующих устройств. Рассмотрен демпфер, который состоит из гильзы и дорна. Показаны силы, действующие на данный демпфер при его функционировании. Представлены зависимости указанных сил от параметров демпфера.

Ключевые слова: демпферы, пластическая деформация, ударная вязкость, напряжения.

ВВЕДЕНИЕ

Для снижения ударно-динамического воздействия на элементы заглубленных стартовых комплексов (командных пунктов и др.) используются демпфирующие устройства. Данные устройства обеспечивают восприятие избыточной внешней нагрузки за счет взаимного перемещения элементов демпфера или их пластического деформирования. Схема применения демпферов для предохранения оборудования, находящегося в контейнере, от ударного воздействия показана на рис. 1 [1, 2].

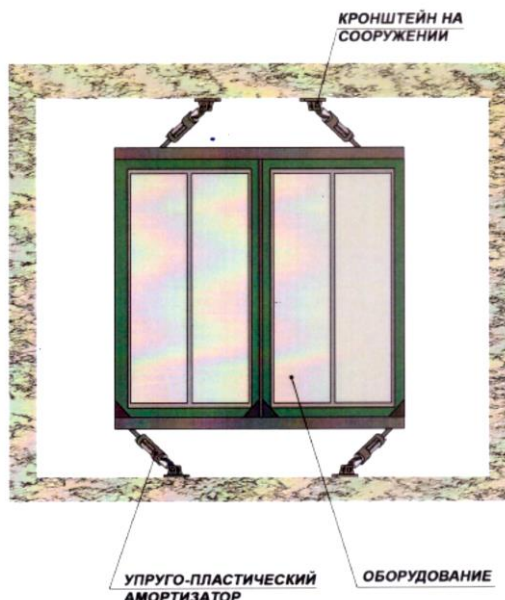


Рис. 1. Схема применения демпфирующих элементов [1, 2]

В работе представлен демпфер, принципиальная схема которого сочетает в себе элементы как пар трения, так и пар упруго-пластического деформирования [2].

Для оценивания демпфирующих возможностей представленного устройства необходимо рассмотреть напряженно-деформированное состояние (НДС) пары дорн – гильза. В данной работе предлагается модель напряженно-деформированного состояния пластически деформируемой гильзы с учетом сил трения на поверхностях оправки дорна.

МОДЕЛЬ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГИЛЬЗЫ ДЕМПИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

Рассмотрим принципиальную схему демпфирующего устройства (рис. 2). Примем допущение, что процесс пластического деформирования – вытяжки (раскатки) гильзы доном сопровождается увеличением внутреннего и внешнего ее диаметров, при этом толщина стенки утоньшается так, что сохраняется постоянство площадей сечения гильзы до и после ее пластического деформирования. При этом возникающая реакция в контактной зоне (между внутренней поверхностью гильзы и внешней поверхностью оправки дорна) распадается на две составные части (см. рис. 3):

1) осевое усилие, или ударно-вязкостная сила – F_B , т. е. сопротивление внешнему воздействию,

$$F_B = \frac{\alpha_n S_1}{h},$$

где α_n – ударная вязкость материала гильзы, Дж/м²;

h – длина перемещения дорна во внутренней полости гильзы, т. е. высота конической поверхности контакта;

S – площадь поперечного сечения гильзы в зоне контакта с оправкой дорна, определяемая выражением

$$S_1 = \pi(r_4^2 - r_2^2).$$

Отсюда получим окончательное значение ударно-вязкостной реакции материала гильзы:

$$F_B = \frac{\alpha_n \pi(r_4^2 - r_2^2)}{h};$$

2) поперечное внутреннее давление – \bar{P} , производящее раскатку внутренней полости гильзы за счет появления соответствующей силы F_p , которая определяется соотношением

$$F_p = \sigma S_2,$$

где σ – обобщенное нормальное напряжение, имеющее место в стенке гильзы, которое, в свою очередь, складывается из двух поперечных нормальных напряжений σ_p и σ_θ , а также одного осевого напряжения σ_z , МПа;

S_2 – площадь комплексной контактной зоны в проекции на вертикаль,

$$S_2 = 2\pi r_4 h.$$

Обобщенное напряжение можно представить следующим образом:

$$p = \sigma = \sqrt{\sigma_p^2 + \sigma_\theta^2},$$

при этом $\sigma_z = \frac{\alpha_n}{h}$ – напряжение, возникающее при ударно-вязкостном воздействии на гильзу, поэтому первое выражение можно переписать следующим образом:

$$F_B = \sigma_z S_1;$$

3) сила трения при движении дорна в полости гильзы

$$F_{тр} = f F_p = f \sigma S_1.$$

Сила трения в проекции на вертикаль (направления усилия извне \bar{Q} и ударно-вязкостного сопротивления F_B):

$$F_{\text{тп}}^* = f\sigma S_1 \cos \alpha,$$

где α – угол наклона конической контактной поверхности к вертикали.

Рассечем гильзу в зоне контакта ее с оправкой дорна (рис. 2, сечение I-I) и определим распределение усилий в пределах этого сечения.

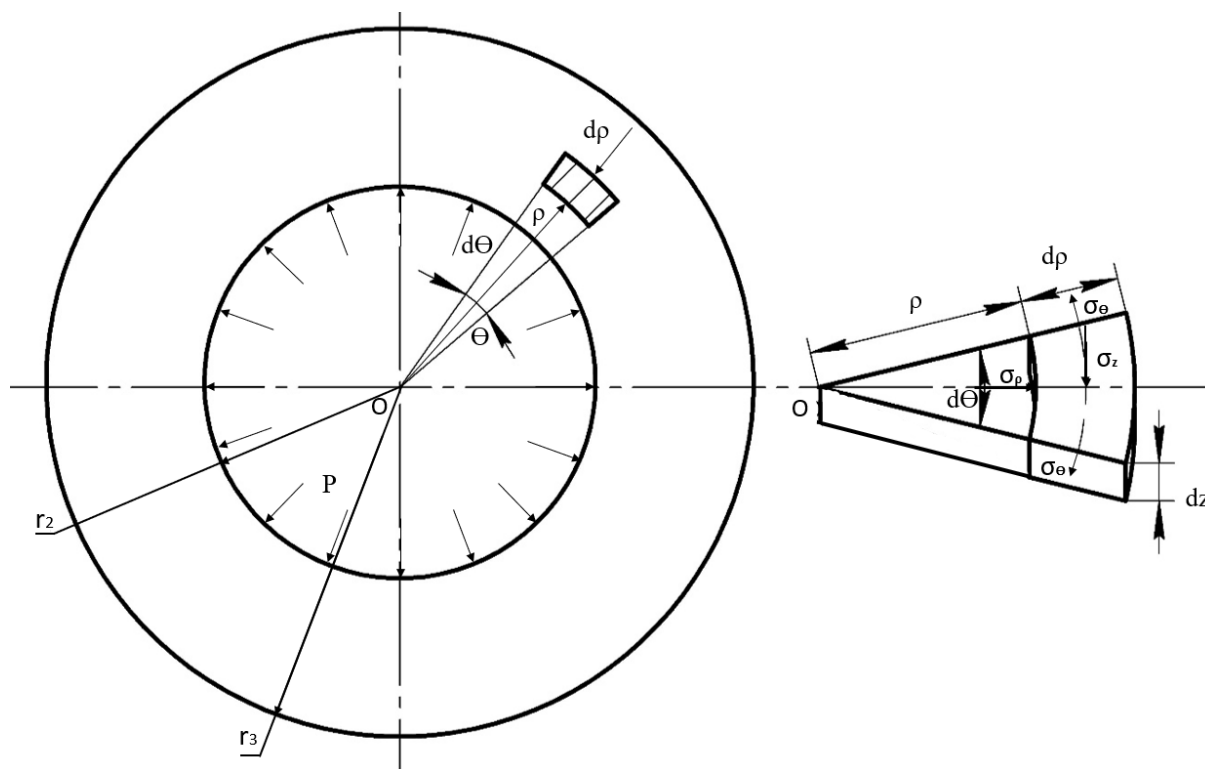


Рис. 4. Распределение давлений и напряжений в сечении I-I (а); напряжение на увеличенном элементе сечения (б), где ρ – текущее значение радиуса ($r_2 \leq \rho \leq r_3$)

Определим напряжения σ_r и σ_θ в стенке гильзы в поперечном сечении. При этом примем следующее допущение: при отсутствии вращения дорна в полости гильзы касательные напряжения равны нулю (эти напряжения имеют место только в контактной зоне на конической поверхности). Кроме этого, площадь сечения гильзы до и после раскатки будет неизменной, как отмечено ранее.

Расчетная схема (см. рис. 2, 3) представляется осесимметричной, поэтому рационально ее рассматривать применительно к решению плоской задачи, которая имеет два варианта решения:

- плоское напряженное состояние;
- плоскую деформацию.

Цилиндрические очертания гильзы и оправки дорна предполагают использование при решении задачи полярных координат (r – полярный радиус). При этом из двух вариантов решения более приближенным к условиям работы гашения ударно-импульсных воздействий является метод плоской деформации. Его преимущества, по сравнению с методом плоского напряженного состояния, заключаются в следующем [3]:

1) задача о плоской деформации решается точно, а при плоском напряженном состоянии – приближенно, так как осуществляется осреднение перемещений по толщине пластины, для которой и используется этот метод ($w \cong 0$, где w – перемещение вдоль оси z – продольной оси);

2) в методе плоской деформации относительная продольная деформация гильзы составляет $w = 0$ (равенство сечений до и после раскатки);

3) при методе плоской деформации коэффициент Пуассона (μ) и предел упругости при растяжении-сжатии E используются без преобразований, как при плоском напряженном состоянии:

$$\mu_0 = \frac{\mu}{1 + \mu}; E_0 = \frac{G}{\rho(1 + \mu_0)},$$

где E_0, μ_0 – модифицированные параметры;
 G – модуль упругости при сдвиге.

Исходя из сказанного для определения напряжений в контактной зоне, стенках гильзы и раскатанной ее части используется задача Ляме [2] как наиболее адаптированная для расчета напряженно-деформируемого состояния (НДС) трубчатых конструкций. Задача Ляме предполагает группу уравнений равновесия в следующем виде:

$$\frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} + \frac{\partial \tau_{\rho\theta}}{\rho \partial \theta} + \frac{\sigma_\rho - \sigma_\theta}{\rho} = 0; \frac{\partial \tau_{\rho\theta}}{\partial \rho} + \frac{\partial \sigma_\theta}{\rho \partial \theta} + \frac{2\tau_{\theta\rho}}{\rho} = 0, \quad (1)$$

В системе (1) напряжения не зависят от угла θ (осесимметричная конструкция), поэтому можно опустить средние члены, содержащие значения θ .

Но бигармоническое уравнение неразрывности запишем в традиционном виде:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial \rho^2} + \frac{\partial}{\rho \partial \rho} + \frac{\partial^2}{\rho^2 \partial \theta^2} \right) \left(\frac{\partial^2 u}{\partial \rho^2} + \frac{\partial u}{\rho \partial \rho} + \frac{\partial^2 u}{\rho^2 \partial^2} \right) = 0, \quad (2)$$

где U – функция напряжений (функция Эри).

Так как функция Эри не зависит от угла θ , то бигармоническое уравнение (2) упрощается:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial \rho^2} + \frac{\partial}{\rho \partial \rho} \right) \left(\frac{\partial^2 u}{\partial \rho^2} + \frac{\partial u}{\rho \partial \rho} \right) = 0, \quad (3)$$

И тогда искомые напряжения определяются следующим образом:

$$\sigma_\rho = \frac{\partial^2 u}{\partial \rho^2} + \frac{\partial u}{\rho \partial \rho}; \sigma_\theta = \frac{\partial^2 u}{\partial \rho^2}; \tau_{\theta\rho} = -\frac{\partial}{\partial \rho} \left(\frac{\partial u}{\rho \partial \theta} \right). \quad (4)$$

Для осесимметричной задачи (что имеет место в нашем случае) уравнение (3) также упрощается:

$$\sigma_\rho = \frac{\partial u}{\rho \partial \rho}; \sigma_\theta = \frac{\partial^2 u}{\partial \rho^2}; \tau_{\theta\rho} = 0. \quad (5)$$

Если подставить уравнение системы (5) в уравнение равновесия, то можно убедиться, что уравнения равновесия удовлетворяются. Продифференцировав бигармоническое уравнение (3), получаем дифференциальное уравнение для определения функции Эри:

$$\frac{\partial^4 u}{\partial \rho^4} + \frac{2\partial^3 u}{\rho \partial \rho^3} - \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho^3} \frac{\partial u}{\partial \rho} = 0,$$

Общий интеграл такого уравнения имеет вид

$$U = A \ln \rho + B \rho^2 \ln \rho + C \rho^2 + D = 0, \quad (6)$$

где A, B, C, D – постоянные интегрирования.

Используя уравнение (6), найдем путем дифференцирования значения искомых напряжений σ_ρ и σ_θ :

$$\sigma_\theta = \frac{\partial^2 u}{\partial \rho^2} = -\frac{A}{\rho^2} + 2B \ln \rho + 3B + 2C. \quad (7)$$

Используя начальные условия ($\sigma_\rho = p$ – внутреннее давление; $\rho = r_2$), найдем постоянные интегрирования:

$$A = -p \frac{\rho^2 r_3^2}{r_3^2 - \rho^2}; B = 0; D = 0 \text{ (при дифференцировании постоянного числа);}$$

$$2C = \frac{p \rho^2}{r_3^2 - \rho^2}.$$

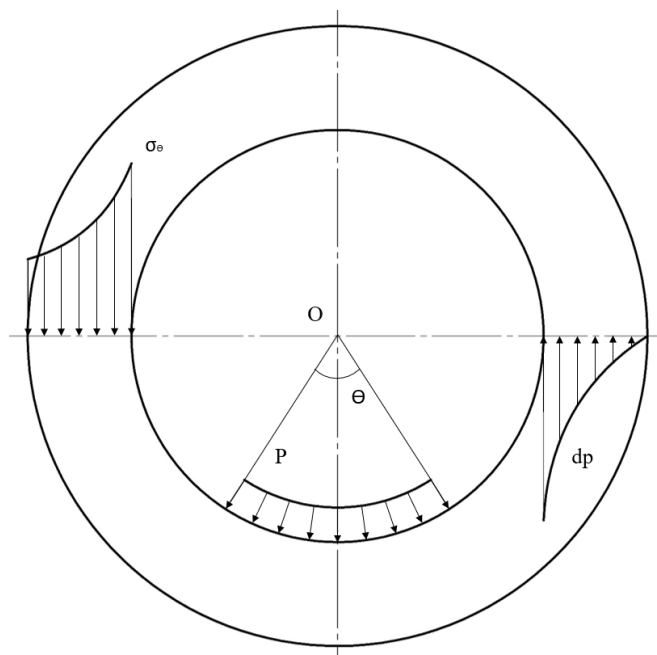


Рис. 5. Эпюры напряжений σ_ρ и σ_θ в стенке гильзы при ее раскатке дорном с конической оправкой

Подставляя полученные значения постоянных интегрирования в систему уравнений (7), найдем окончательные зависимости для определения напряжений:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_\rho &= \frac{pr_2^2}{r_3^2 - r_2^2} \left(1 - \frac{r_3^2}{\rho^2} \right); \\ \sigma_\theta &= \frac{pr_2^2}{r_3^2 - r_2^2} \left(1 + \frac{r_3^2}{\rho^2} \right). \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Эпюры указанных напряжений в стенке гильзы при ее раскатке изображены на рис. 5.

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ. РЕКОМЕНДАЦИИ

Принимая во внимание уравнения системы (8) для напряжений, можно найти количественные значения сил $\bar{F}_{тр}$ и $\bar{F}_в$, которые, действуя навстречу ударному воздействию \bar{Q} извне, могут существенно ослабить внешнюю силу \bar{Q} . Если же сопротивление будет недостаточным, то можно установить несколько демпферов, рационально разместив их по периметру защищаемого объекта.

Для обоснования выбора конструкционного материала гильзы учтем рекомендации, указанные в источнике [3]. Согласно выражению $\bar{F}_в$ одной из основных характеристик материала должна являться его ударная вязкость a_n (в Дж/м²), т. е. способность поглощать механическую энергию в процессе деформирования под действием ударной нагрузки. Эта характеристика материала оценивается работой, необходимой для деформирования и разрушения стандартного призматического образца с надрезом [3]. Резкое падение значения этой характеристики возможно при отрицательных температурах, когда проявляется так называемая хладноломкость, т. е. охрупчивание материала с появлением условий для образования трещин в теле гильзы. В нашем случае наиболее возможными и наиболее опасными могут быть продольные трещины в области расширения гильзы при раскатке в процессе противостояния ударному воздействию извне, то есть трещины 1-й категории. [4]

Материалами с достаточно высокой ударной вязкостью являются стали 1–3-го классов (строительные, машиностроительные, конструкционные), а также чугун (ковкий, ферритный). У этих материалов значение ударной вязкости находится в пределах $a_n = (2,5 - 5,5)10^5$ Дж/м². Склонность материала гильзы к трещинообразованию при хладноломкости можно оценивать по коэффициенту интенсивности напряжений при образовании продольных трещин 1-го вида (K_I), когда поток энергии извне к вершинам возможных трещин определяется по зависимости [6]:

$$W = \frac{1-\mu^2}{g} K_{кр}^2 [\text{Дж/м}^2],$$

где W – поток энергии, сопоставимый со значением ударной вязкости материала;

g – ускорение силы тяжести;

$K_{кр}$ – критическое значение коэффициента интенсивности напряжений при образовании трещин для различных материалов приводятся ниже [2]:

Материал	$K_{кр}$, МПа·м ^{1/2}
Сталь	11,06
Чугун	3,16
Дюраль	11,06
Полистирол	0,41

Условие невосприимчивости материала к трещинообразованию первого вида:

$$K_T \leq K_{кр},$$

где K_T – текущее значение коэффициента интенсивности напряжений.

Далее, значение $K_{кр}$ уменьшается при достижении пластического состояния материала гильзы (рис. 6).

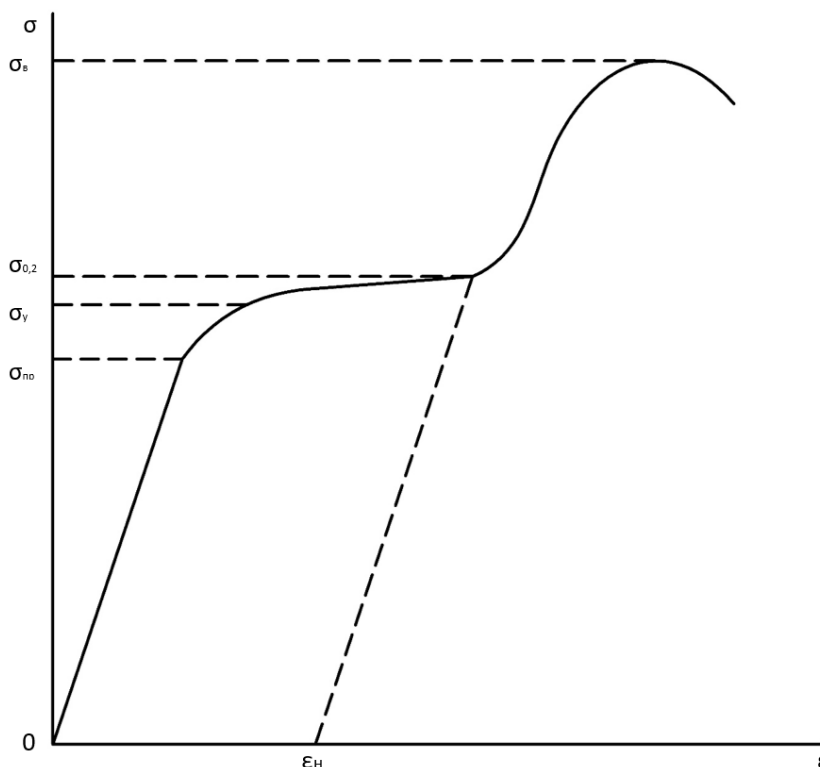


Рис. 6. Диаграмма напряжение – деформация, где ε – относительная линейная деформация; $\sigma_{пр}$ – предел пропорциональности; σ_y – предел упругости; $\sigma_{0,2}$ – предел текучести (без учета упругих деформаций); σ_B – временное сопротивление; ε_H – деформация при наличии наклепа

Исходя из указанного ранее, можно назвать следующие условия функционирования рассматриваемого демпфера:

1) $n(F_{\text{в}} + F_{\text{тр}} \cos \alpha) \geq Q = mg$ – условие, когда отсутствует ударно-динамическое воздействие и задача демпфера (n – количество демпферов) заключается в удержании объекта массой m в неподвижном состоянии (g – ускорение свободного падения);

2) $n(F_{\text{в}} + F_{\text{тр}} \cos \alpha) < m(a + g)$ – условие, когда присутствует ударно-динамическое воздействие и задача демпфера – воспринять данное воздействие за счет пластического деформирования гильзы с учетом сил $F_{\text{в}}$ и $F_{\text{тр}}$ (где a – ускорение ударно-динамического воздействия).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана математическая модель напряженно-деформированного состояния пластически деформированного элемента упруго-пластического демпфера. Показана зависимость основных сил, определяющих демпфирующие свойства рассматриваемых элементов, от их геометрических параметров. Получены эпюры напряжений и распределение сил при функционировании демпфера. Обоснованы условия правильного функционирования демпфера.

Список используемых источников

1. Гуськов В. Д., Долбенков В. Г., Лямин К. А. Типовые амортизирующие и демпфирующие устройства систем амортизации, созданные АО «КБСМ» в период с 1960 года по 2017 год. – СПб.: АО КБСМ, 2018. – 171 с.

2. Ост 92-1312-87. Отраслевой стандарт. Амортизаторы упруго-пластические для защиты аппаратуры. Конструкция // КонсультантПлюс : справочно-правовая система. – URL: <https://www.consultant.ru/document> (дата обращения: 25.03.2023).

3. Прокатное производство : справочник / под ред. Е. С. Рокатяна. – 1968. – Т. 1-2. – 461 с.

4. Горшков Л. К. Основы теории упругости и пластичности в разведочном бурении. – СПб., 1992 – 151 с.

5. Фридман Я. Б. Механические свойства металлов. – Изд. третье. – М., 1974. – 382 с.

6. Партон В. З. Механика разрушения: от теории к практике. – СПб.: Наука, 1990. – 240 с.

И. В. Дорожко,
кандидат технических наук;
А. Л. Копейка,
кандидат технических наук;
Е. А. Копейка,
кандидат технических наук

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНИВАНИЮ ДОСТОВЕРНОСТИ МНОГОЭТАПНОГО КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКИХ БАЙЕСОВСКИХ СЕТЕЙ ДОВЕРИЯ

Разработана методика построения модели для оценивания вероятностей видов технического состояния объекта при поступлении результатов контроля. В ней учитываются времена поступления результатов контроля, а также динамика технического состояния, связанная с априорными сведениями о надежности объекта. Даны рекомендации для учета модели по продолжительности и периодичности контроля. Для разработки модели применен аппарат байесовских сетей, позволяющий упростить и формализовать процессы определения, анализа и прогнозирования технического состояния объектов с учетом результатов многоэтапного контроля.

Ключевые слова: испытания, контроль технического состояния, достоверность, ошибки первого и второго рода, модель, сложные технические системы, байесовская сеть доверия, система контроля.

ВВЕДЕНИЕ

Проектирование систем контроля (СК) требует решения целого ряда сложных задач, одной из которых является обеспечение требуемой достоверности контроля [1–3]. При оценке СК становится очевидным, что, наряду с такими характеристиками, как быстродействие, габариты, вес и надежность, достоверность контроля играет чаще всего основную роль. Это связано с тем, что СК в первую очередь – это системы информационные, предназначенные для сбора, обработки и оценки информации, поскольку конечная цель контроля заключается в определении того технического состояния (ТС) объекта контроля (ОК), в котором действительно находится ОК, т. е. в определении фактического ТС. Поэтому большой практический интерес представляют показатели, позволяющие судить о том, насколько можно доверять СК. В качестве основной характеристики СК, выражающей по существу само назначение контроля состояния объекта, принимается достоверность контроля, количественно выражающая ее способность правильно отображать реальное состояние объекта. В качестве основного результата контроля ТС при его проведении в целях определения работоспособности ОК выступает принятие решения о его годности (готовности): на этапе экспериментальной отработки – к последующим испытаниям или к постановке на производство, а на этапе эксплуатации – к применению по назначению. Однако существующие модели оценивания показателей СК не рассматривают динамику ТС в различные моменты времени.

ОСНОВНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ БАЙЕСОВСКИХ СЕТЕЙ ДЛЯ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИ ОЦЕНИВАНИИ ДОСТОВЕРНОСТИ КОНТРОЛЯ

При анализе достоверности многоэтапных испытаний необходимо определять показатели достоверности контроля технического состояния (КТС) ОК после заключительного этапа испытаний. Зачастую во время испытаний происходят отказы техники, которые существенно влияют на ход испытаний и вероятность работоспособного ТС ОК. Поскольку испытания но-

сят динамический характер, то справедливо оценивать вероятность работоспособного ТС ОК в динамике. Как правило, в условиях неопределенности и ограниченного времени оператор во время проведения испытаний получает большое количество информации о состоянии датчиков, узлов, поэтому целесообразно получать прогнозные значения вероятностей ТС ОК для использования быстрого принятия решений по восстановлению системы.

В области построения временных вероятностных графовых моделей активно развиваются и используются байесовские сети доверия (БСД) [4–9], которые обладают следующими преимуществами.

1. Высокая эффективность решения задач для сложных систем с большим числом переменных. Используя правило декомпозиции, в байесовских сетях можно охватить огромное число элементов и связей между ними.

2. Учет поступления новой информации, которую в терминологии байесовских сетей называют свидетельствами. При поступлении свидетельств производится пересчет всей байесовской сети. В большинстве случаев естественные человеческие способности не позволяют адекватно оценить влияние поступившего свидетельства и принять решение, особенно при значительном количестве объектов и связей.

3. Интеграция разнородных данных. В байесовских сетях имеется возможность учета как статистических данных, так и экспертных оценок.

4. Простота интерпретации и наглядность. Графовые модели достаточно хорошо воспринимаются и анализируются.

5. Возможность учета динамических свойств, что позволяет решать задачи не только текущего оценивания, но и прогнозирования и ретроспективного анализа. Легко осуществляется анализ по сценарию «что если...». Это позволяет оценивать различные варианты развития процесса или изменения состояния системы.

6. Байесовские сети способны обучаться, это позволяет поддерживать принятие достоверных решений в условиях возможной ошибочной информации.

7. Байесовские сети доверия опираются на современные доступные программные технологии (*Microsoft Bayesian Network Editor, Bayes Net Toolbox for Matlab, GeNIe, Smile, AgenaRisk, Analytica, Bayes Server, Hugin Expert*). Существуют готовые библиотеки и модули для *Python, C++, C#, MatLab, VB.NET* и для различных операционных систем (*Windows, Linux, macOS*).

8. Байесовские сети обладают относительной нечувствительностью к неполным данным.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задача КТС ОК в целях определения его работоспособности сводится к задаче распознавания двух объективно возможных ТС ОК: работоспособного (R) и неработоспособного (nR) и принятия решения о результатах контроля ОК: годен ((G/R) , (G/nR)) или негоден ($(nG)/(R)$, $(nG)/(nR)$).

Формализованную обобщенную модель оценивания результатов контроля испытаний можно описать в следующем виде:

$$\langle Gr, PAR \rangle,$$

где Gr – ациклический направленный граф;

PAR – множество параметров, определяющих БСД.

Вершинами ациклического направленного графа являются:

– блоки объекта $\mathbf{B} = \{b_i | i = \overline{1, n}\}$ с указанием для каждого i -го блока вида технического состояния $\mathbf{S} = \{S_j^i | j = \overline{0, m}, i = \overline{1, n}\}$. Например, работоспособное ($S_0^i = R^i$) и неработоспособное ($S_1^i = nR^i$);

– блоки системы контроля $\mathbf{SK} = \{sk_l | l = \overline{1, k}\}$, для которых заданы результаты контроля.

Параметрами байесовской сети являются:

– распределения вероятностей, задающих виды ТС с учетом надежности объекта $\{P(S_j^i) | i = \overline{1, n}; j = \overline{0, m}\}$, т. е. априорных вероятностей;

– распределения условных вероятностей, задающих зависимость результатов контроля от видов ТС с учетом контроля $\{P(G/S_j^i), P(nG/S_j^i) | i = \overline{1, n}; j = \overline{0, m}\}$.

Требуется: определить вероятности видов ТС при поступлении результата контроля – $\{P(S_j^i/G), P(S_j^i/nG) | i = \overline{1, n}; j = \overline{0, m}\}$, т. е. апостериорные вероятности.

На рис. 1 представлен вид байесовской сети, построенной по априорной информации (рис. 1,а) и при поступлении новой информации (рис. 1,б).

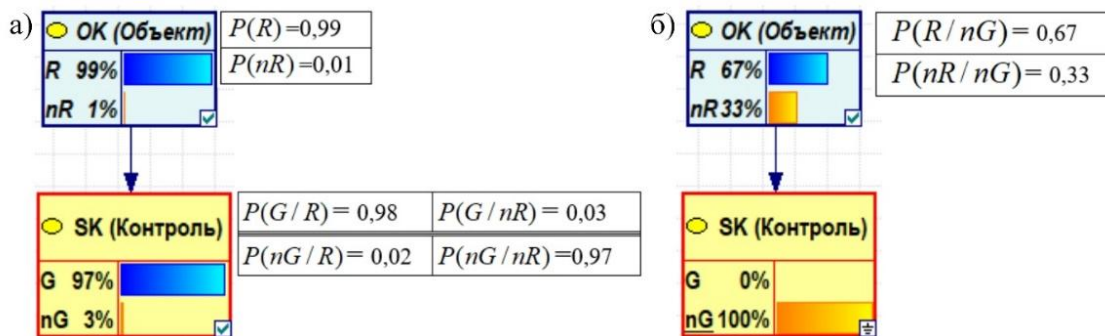


Рис. 1. Вид байесовской сети, построенной:

а – по априорной информации; б – при поступлении новой информации – результата контроля «негоден»

Вероятности $P(G)$ и $P(nG)$ вычисляются по исходным данным следующим образом:

$$P(G) = P(G/R) \cdot P(R) + P(G/nR) \cdot P(nR) = 0,98 \cdot 0,99 + 0,03 \cdot 0,01 = 0,97;$$

$$P(nG) = P(nG/R) \cdot P(R) + P(nG/nR) \cdot P(nR) = 0,02 \cdot 0,99 + 0,97 \cdot 0,01 = 0,03. \quad (1)$$

Апостериорные вероятности вычисляются в данном случае достаточно просто по известной формуле Байеса [4–9]:

$$P(R/nG) = \frac{P(nG/R) \cdot P(R)}{P(nG/R) \cdot P(R) + P(nG/nR) \cdot P(nR)} = \frac{0,02 \cdot 0,99}{0,02 \cdot 0,99 + 0,97 \cdot 0,01} \approx 0,67;$$

$$P(nR/nG) = \frac{P(nG/nR) \cdot P(nR)}{P(nG/R) \cdot P(R) + P(nG/nR) \cdot P(nR)} = \frac{0,97 \cdot 0,01}{0,02 \cdot 0,99 + 0,97 \cdot 0,01} \approx 0,33; \quad (2)$$

$$P(R/G) = \frac{P(G/R) \cdot P(R)}{P(G/R) \cdot P(R) + P(G/nR) \cdot P(nR)};$$

$$P(nR/G) = \frac{P(G/nR) \cdot P(nR)}{P(G/R) \cdot P(R) + P(G/nR) \cdot P(nR)}.$$

Как видно из расчетов, при поступлении такого результата контроля, как «негоден» вероятность работоспособного состояния уменьшается с 0,99 до 0,67, но остается по-прежнему достаточно высокой, больше вероятности неработоспособного состояния. Это связано с низкой достоверностью контроля, так как по исходным данным ошибки контроля ($P(nG/R) = \alpha = 0,02$ и $P(G/nR) = \beta = 0,03$) превышают априорную вероятность неработоспособного состояния ($P(nR) = 0,01$).

При использовании обозначений ошибок 1-го и 2-го рода формулы (2) можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} P(R/nG) &= \frac{P(nG/R) \cdot P(R)}{P(nG/R) \cdot P(R) + P(nG/nR) \cdot P(nR)} = \frac{\alpha \cdot P(R)}{\alpha \cdot P(R) + (1-\beta) \cdot P(nR)}; \\ P(nR/nG) &= \frac{P(nG/nR) \cdot P(nR)}{P(nG/R) \cdot P(R) + P(nG/nR) \cdot P(nR)} = \frac{(1-\beta) \cdot P(nR)}{\alpha \cdot P(R) + (1-\beta) \cdot P(nR)}; \\ P(R/G) &= \frac{P(G/R) \cdot P(R)}{P(G/R) \cdot P(R) + P(G/nR) \cdot P(nR)} = \frac{(1-\alpha) \cdot P(R)}{(1-\alpha) \cdot P(R) + \beta \cdot P(nR)}; \\ P(nR/G) &= \frac{P(G/nR) \cdot P(nR)}{P(G/R) \cdot P(R) + P(G/nR) \cdot P(nR)} = \frac{\beta \cdot P(nR)}{(1-\alpha) \cdot P(R) + \beta \cdot P(nR)}. \end{aligned} \quad (3)$$

Апостериорные вероятности, вычисленные после получения результата контроля, становятся априорной информацией для следующего этапа контроля. Так, например, при получении на первом этапе контроля результата «негоден» и на втором – также повторно «негоден», апостериорная вероятность работоспособного состояния будет вычисляться следующим образом:

$$\begin{aligned} P(R/nG, nG) &= \frac{P(nG/R) \cdot P(R/nG)}{P(nG/R) \cdot P(R/nG) + P(nG/nR) \cdot P(nR/nG)} = \\ &= \frac{0,02 \cdot 0,67}{0,02 \cdot 0,67 + 0,97 \cdot 0,33} \approx 0,04. \end{aligned} \quad (4)$$

Схема, представленная на рис. 1, соответствует двухальтернативному контролю ТС ОК и при соответствующем задании вероятностей, характеризующих достоверность результатов контроля, может быть отнесена к оценке ТС ОК. Также в данной схеме произведен учет продолжительности контроля, т. е. результат контроля может быть получен не мгновенно, а спустя время t_k .

В работе [10] рассмотрена модель, связывающая результаты контроля с видами технического состояния объекта. Такая модель представлена в виде графа состояний процесса контроля ТС объекта. В качестве ТС процесса выступают работоспособные и неработоспособные состояния ОК, а также состояния, в которых проводится контроль. В развитие данной модели рассмотрим усовершенствованную модель КТС, в которой будет учитываться динамика ТС в различные моменты времени.

Возможны четыре варианта результатов контроля:

1) $P(G(t+t_k)/R(t))$ – вероятность того, что работоспособный ОК признан годным (достоверный результат контроля);

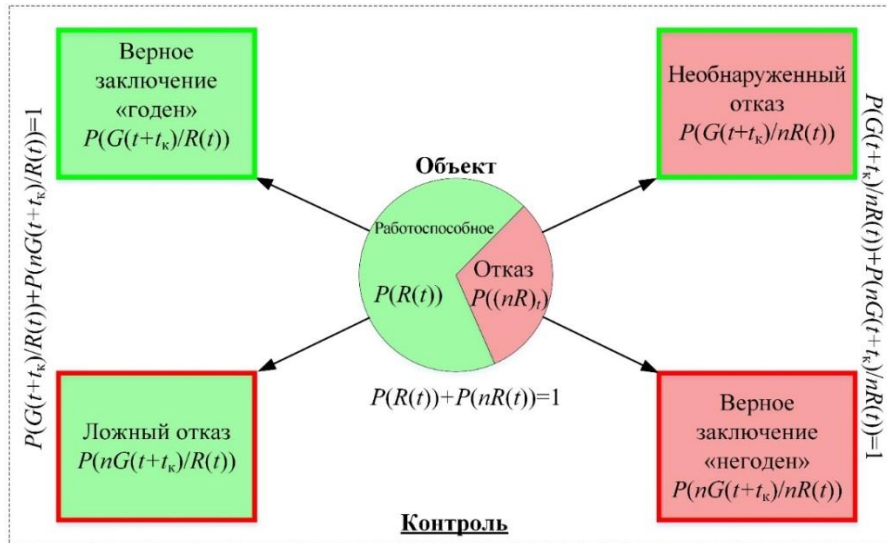


Рис. 2. Обобщенная схема формирования результатов контроля технического состояния

- 1) $P(nG(t+t_k)/R(t))$ – вероятность того, что работоспособный ОК признан негодным – ложный отказ (ошибка 1-го рода);
- 2) $P(G(t+t_k)/nR(t))$ – вероятность того, что неработоспособный ОК признан годным – необнаруженный отказ (ошибка 2-го рода);
- 3) $P(nG(t+t_k)/nR(t))$ – вероятность того, что неработоспособный ОК признан негодным (достоверный результат контроля).

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ МНОГОЭТАПНОГО КОНТРОЛЯ ИСПЫТАНИЙ НА ОСНОВЕ БАЙЕСОВСКОЙ СЕТИ

Методика построения многоэтапного контроля испытаний на основе байесовской сети может быть представлена следующими этапами.

1. Построение структуры байесовской сети доверия.

1.1. Создать вершины (node) байесовской сети, обозначающие элементы или блоки ОК $\mathbf{B} = \{b_i | i = \overline{1, n}\}$ с указанием для каждого i -го блока ОК вида ТС $S_i | i = \overline{0, m}$ (рис. 3), например: работоспособное (R_i) и неработоспособное, т. е. отказ (nR_i) [11].

1.2. Задать темпоральные связи для учета динамики изменения ТС элементов ОК (рис. 3). Данная темпоральная связь позволяет смоделировать временную логико-вероятностную зависимость текущего состояния переменной от более ранних состояний.

1.3. Создать вершины (node) байесовской сети, обозначающие результаты контроля $\mathbf{SK} = \{sk_l | l = \overline{1, k}\}$ с учетом достоверности и ошибок ($\mathbf{A} = \{\alpha_l | l = \overline{1, k}\}$, $\mathbf{B} = \{\beta_l | l = \overline{1, k}\}$).

1.4. Указываются связи между вершинами байесовской сети, обозначающими ТС ОК $S_i | i = \overline{0, m}$ и результаты контроля $\mathbf{SK} = \{sk_l | l = \overline{1, k}\}$. Для учета продолжительности контроля необходимо также использовать темпоральную связь (рис. 3).

2. Указываются параметры байесовской сети (рис. 3 и табл. 1):

– безусловные вероятности видов ТС в начальный момент времени (предполагается, что в $t = 0$ прошел полный контроль и элементы ОК работоспособны);

– условные вероятности, задающие динамику ТС во времени на основе априорных данных об интенсивностях отказов (λ_i) и восстановлений (μ_i); условные вероятности, задающие зависимость результата контроля от вида технического состояния.

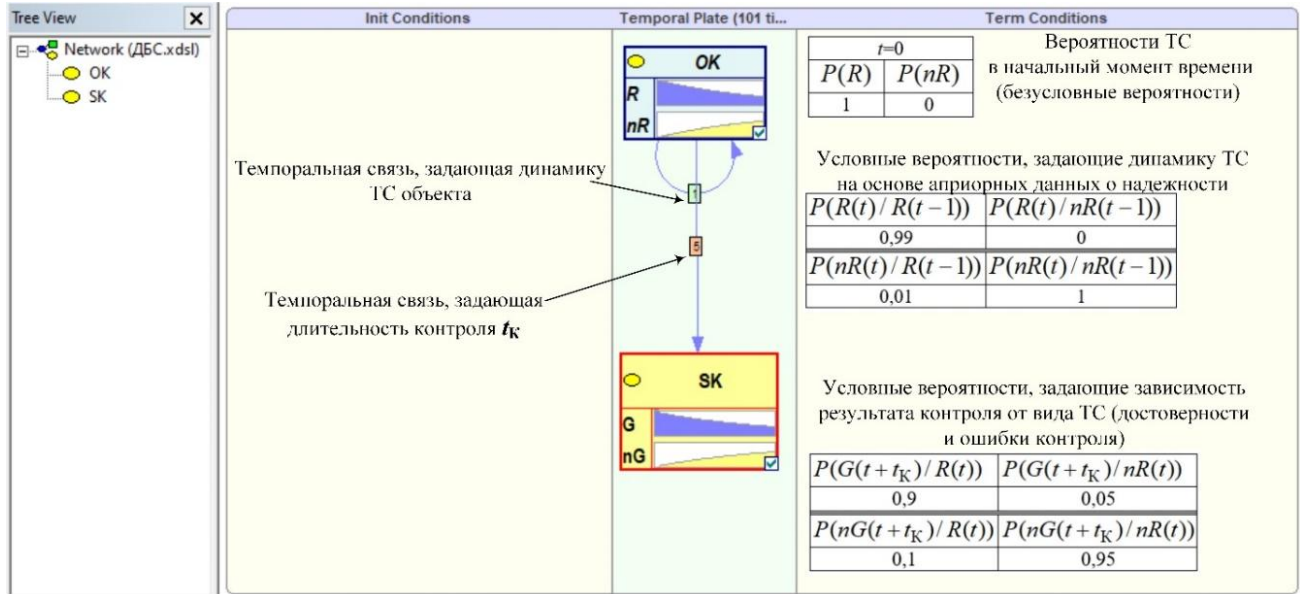


Рис. 3. Вершины байесовской сети, обозначающие объект и систему контроля

Таблица 1

Параметры динамической БСД

Вероятности видов ТС для $t = 0$	Условные вероятности, задающие динамику ТС во времени на основе априорных данных о надежности объекта ($t = 1$)	Условные вероятности, задающие зависимость результата контроля от вида технического состояния
$P(R_i(t = 0)) = 1$	$P(R_i(t) / R_i(t - 1)) = \frac{e^{-\lambda_i t}}{e^{-\lambda_i (t-1)}} = e^{-\lambda_i}$	$P(G_i(t + t_K) / R_i(t))$
	$P(nR_i(t) / R_i(t - 1)) = 1 - e^{-\lambda_i}$	$P(nG_i(t + t_K) / R_i(t))$
$P(nR_i(t = 0)) = 0$	$P(R_i(t) / nR_i(t - 1)) = 1 - e^{-\mu_i}$	$P(G_i(t + t_K) / nR_i(t))$
	$P(nR_i(t) / nR_i(t - 1)) = e^{-\mu_i}$	$P(nG_i(t + t_K) / nR_i(t))$

В динамической БСД вероятности видов ТС вычисляются по заданным вероятностям перехода следующим образом:

$$\begin{aligned}
 & [P(R(t)) \quad P(nR(t))] = \\
 & = \begin{bmatrix} P(R(t)/R(t-1)) & P(R(t)/nR(t-1)) \\ P(nR(t)/R(t-1)) & P(nR(t)/nR(t-1)) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P(R(t-1)) \\ P(nR(t-1)) \end{bmatrix}. \tag{5}
 \end{aligned}$$

Вероятности (5) задают динамику видов технического состояния с учетом априорных сведений о надежности (справочные данные об интенсивностях отказов и восстановлений, сведения об аналогах и т. п.).

При поступлении результата контроля в динамической байесовской сети производится расчет апостериорных вероятностей видов технических состояний с учетом времени:

$$P(R(t)/nG(t)) = \frac{P(nG(t)/R(t)) \cdot P(R(t))}{P(nG(t)/R(t)) \cdot P(R(t)) + P(nG(t)/nR(t)) \cdot P(nR(t))}; \quad (6)$$

$$P(nR(t)/nG(t)) = \frac{P(nG(t)/nR(t)) \cdot P(nR(t))}{P(nG(t)/R(t)) \cdot P(R(t)) + P(nG(t)/nR(t)) \cdot P(nR(t))}.$$

С учетом продолжительности контроля получим

$$\begin{aligned} P(R(t-t_k)/nG(t)) &= \\ &= \frac{P(nG(t)/R(t-t_k)) \cdot P(R(t-t_k))}{P(nG(t)/R(t-t_k)) \cdot P(R(t-t_k)) + P(nG(t)/nR(t-t_k)) \cdot P(nR(t-t_k))}. \end{aligned} \quad (7)$$

Таким образом, вычисленное значение вероятности вида ТС $P(R(t-t_k)/nG(t))$ будет на момент времени $t-t_k$, а для нахождения $P(R(t)/nG(t))$ и $P(nR(t)/nG(t))$ необходимо также использовать матрицу вероятностей переходов

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} P(R(t-t_k+1)/nG(t)) & P(nR(t-t_k+1)/nG(t)) \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} P(R(t)/R(t-1)) & P(R(t)/nR(t-1)) \\ P(nR(t)/R(t-1)) & P(nR(t)/nR(t-1)) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P(R(t-t_k)/nG(t)) \\ P(nR(t-t_k)/nG(t)) \end{bmatrix} \\ & \quad \vdots \\ & \begin{bmatrix} P(R(t)/nG(t)) & P(nR(t)/nG(t)) \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} P(R(t)/R(t-1)) & P(R(t)/nR(t-1)) \\ P(nR(t)/R(t-1)) & P(nR(t)/nR(t-1)) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P(R(t-1)/nG(t)) \\ P(nR(t-1)/nG(t)) \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (8)$$

Например, если в момент времени $t = 4$ ч был проведен контроль с продолжительностью 5 ч ($t_k = 5$ ч) и в момент времени $t = 9$ ч получен результат «негоден», то можно вычислить $P(R(9)/nG(9))$ следующим образом. Сначала необходимо вычислить с помощью априорных данных вероятности видов ТС на момент $t = 4$ ч:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} P(R(1)) & P(nR(1)) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} P(R(t)/R(t-1)) & P(R(t)/nR(t-1)) \\ P(nR(t)/R(t-1)) & P(nR(t)/nR(t-1)) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P(R(0)) \\ P(nR(0)) \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} 0,99 & 0 \\ 0,01 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,99 & 0,01 \end{bmatrix} \\ & \quad \vdots \\ & \quad \vdots \\ & \quad \vdots \\ \begin{bmatrix} P(R(4)) & P(nR(4)) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} P(R(t)/R(t-1)) & P(R(t)/nR(t-1)) \\ P(nR(t)/R(t-1)) & P(nR(t)/nR(t-1)) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P(R(3)) \\ P(nR(3)) \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} 0,99 & 0 \\ 0,01 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0,970299 \\ 0,029701 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,96059601 & 0,03940399 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Далее определяем, как обновятся данные вероятности при поступлении результата контроля, осуществляем апостериорный вывод:

$$\begin{aligned} P(R(t-t_K)/nG(t)) &= P(R(4)/nG(9)) = \\ &= \frac{P(nG(t)/R(t-t_K)) \cdot P(R(t-t_K))}{P(nG(t)/R(t-t_K)) \cdot P(R(t-t_K)) + P(nG(t)/nR(t-t_K)) \cdot P(nR(t-t_K))} = \\ &= \frac{P(nG(t)/R(t-t_K)) \cdot P(R(4))}{P(nG(t)/R(t-t_K)) \cdot P(R(4)) + P(nG(t)/nR(t-t_K)) \cdot P(nR(4))} = \\ &= \frac{0,1 \cdot 0,96059601}{0,1 \cdot 0,96059601 + 0,95 \cdot 0,03940399} = 0,71958319; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P(nR(t-t_K)/nG(t)) &= P(nR(4)/nG(9)) = \\ &= \frac{P(nG(t)/nR(t-t_K)) \cdot P(nR(t-t_K))}{P(nG(t)/R(t-t_K)) \cdot P(R(t-t_K)) + P(nG(t)/nR(t-t_K)) \cdot P(nR(t-t_K))} = \\ &= \frac{P(nG(t)/nR(t-t_K)) \cdot P(nR(4))}{P(nG(t)/R(t-t_K)) \cdot P(R(4)) + P(nG(t)/nR(t-t_K)) \cdot P(nR(4))} = \\ &= \frac{0,95 \cdot 0,03940399}{0,1 \cdot 0,96059601 + 0,95 \cdot 0,03940399} = 0,28041681. \end{aligned}$$

И наконец, используя снова модель перехода, вычисляем вероятности видов ТС на момент времени $t=9$ ч:

$$\begin{aligned} & [P(R(5)/nG(9)) \quad P(nR(5)/nG(9))] = \\ &= \begin{bmatrix} P(R(t)/R(t-1)) & P(R(t)/nR(t-1)) \\ P(nR(t)/R(t-1)) & P(nR(t)/nR(t-1)) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P(R(4)/nG(9)) \\ P(nR(4)/nG(9)) \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} 0,99 & 0 \\ 0,01 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0,71958319 \\ 0,28041681 \end{bmatrix} = [0,71238736 \quad 0,28761264] \\ & \quad \vdots \\ & \quad \vdots \\ & [P(R(9)/nG(9)) \quad P(nR(9)/nG(9))] = \\ &= \begin{bmatrix} P(R(t)/R(t-1)) & P(R(t)/nR(t-1)) \\ P(nR(t)/R(t-1)) & P(nR(t)/nR(t-1)) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P(R(8)/nG(9)) \\ P(nR(8)/nG(9)) \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} 0,99 & 0 \\ 0,01 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0,69122874 \\ 0,30877126 \end{bmatrix} = [0,68431646 \quad 0,31568354]. \end{aligned}$$

С помощью динамической БСД можно прогнозировать ТС объекта контроля (рис. 4), а также обрабатывать последующие результаты многоэтапного контроля. Так, на рис. 5 представлен итог обработки полученного следующего результата контроля «негоден».

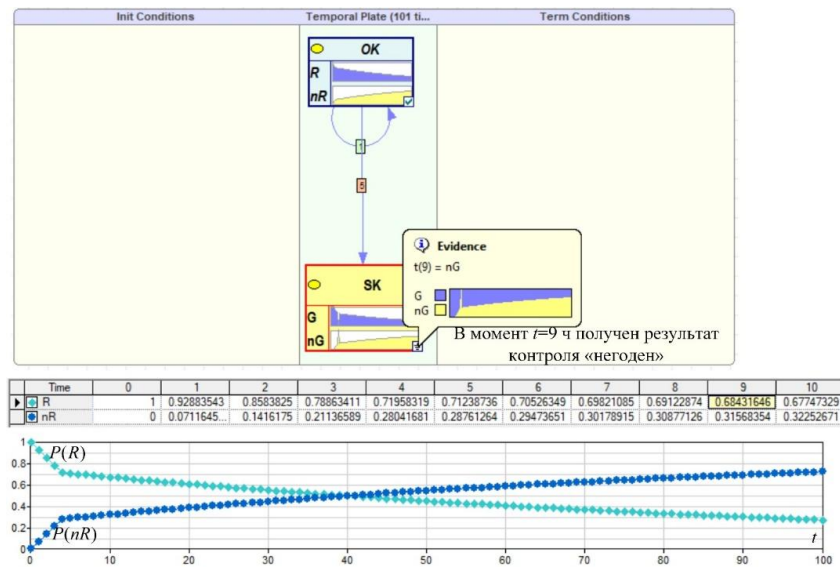


Рис. 4. Обработка полученного свидетельства «негоден» в момент времени $t = 9$ ч с помощью динамической БСД

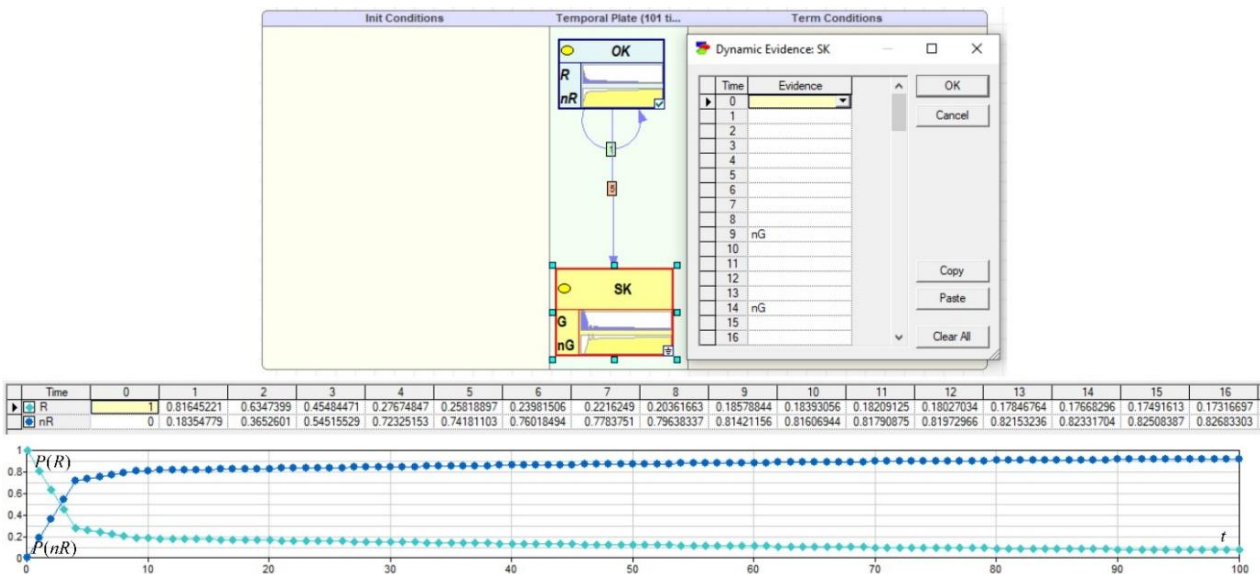


Рис. 5. Обработка результатов многоэтапного контроля с помощью динамической БСД

Из рассмотрения представленного примера видно, что после повторного получения результата контроля «негоден» вероятность работоспособного состояния снижается до 0,176 в момент времени $t = 14$ ч.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные результаты свидетельствуют о вычислительных возможностях динамических байесовских сетей доверия при решении задач многоэтапного контроля и прогнозирования технического состояния объекта. Данные модели позволяют учитывать показатели

контроля (достоверность, периодичность, длительность), а также показатели надежности, определяющие динамику технического состояния объекта (интенсивности отказов и восстановлений). Испытания сложных технических систем являются сложным технологическим процессом, реализуемым на основе научных подходов, представленных в виде программ и методик испытаний, которые обеспечивают достижение цели испытаний.

Оценивание достоверности КТС ОИ – это одна из важных задач, решаемых при планировании испытаний и анализе их результатов, поскольку достоверность КТС ОИ определяет достоверность оценки свойств ОИ по результатам испытаний, характеризующую эффективность испытаний, и исходя из требуемой достоверности результатов испытаний осуществляется определение объема испытаний. В общем случае достоверность КТС сложных технических систем определяется целым рядом факторов, связанных как с ОИ, так и с системой испытаний в целом.

Представленные результаты определяют принципы использования при анализе достоверности КТС ОИ в процессе проведения испытаний, а математический аппарат байесовских сетей может эффективно применяться в диагностическом оборудовании и использоваться для решения задач прогнозирования и ретроспективного анализа сложных технических систем.

Список используемых источников

1. ГОСТ В 20.911-89. Техническая диагностика. Термины и определения. – М. : Изд-во стандартов, 1990. – 12 с.
2. Клюев В. В. Технические средства диагностирования. – М. : Машиностроение, 1989. – 671 с.
3. Мальцев Г.Н., Якимов В. Л. Достоверность многоэтапного контроля технического состояния объектов испытаний // Информационно-управляющие системы. – 2018. – № 1. – С. 49–57.
4. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект : современный подход. – М. : изд. дом «Вильямс», 2006. – 1408 с.
5. Сукар Л. Э. Вероятностные графовые модели. Принципы и приложения. – М. : ДМК Пресс, 2021. – 338 с.
6. Тулупьев А. Л., Николенко С. И., Сироткин А. В. Основы теории байесовских сетей : учебник. – СПб. : Изд-во Санкт-Петерб. ун-та, 2019. – 399 с.
7. Probabilistic Networks and Expert Systems / G. R. Cowell [et al.]. – Springer-Verlag, 1999. – 321 p.
8. Jensen F. V. Bayesian Networks and Decision Graphs. – New York : Springer-Verlag, 2007. – 447 p.
9. Pearl J. Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference. – New York : Morgan Kaufman Publ., 1991. – 584 p.
10. Гуменюк В. М. Надежность и диагностика электротехнических систем. – Владивосток : Изд-во Дальневост. гос. техн. ун-та, 2010. – 218 с.
11. GeNIe & SMILE. Decisions systems laboratory. School of Information Sciences / University of Pittsburg. – URL: <http://genie.sis.pitt.edu/> (дата обращения: 15.05.2023).

А. В. Ильин,
кандидат технических наук;
В. В. Карагодин,
доктор технических наук, профессор;
Д. В. Рыбаков,
кандидат технических наук

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ ЕЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

Процессы модернизации систем электроснабжения объектов военной инфраструктуры должны осуществляться с применением передовых энергоэффективных технологий, предусматривающих применение цифровых устройств автоматизации, алгоритмы программного обеспечения которых должны быть проверены на моделях энергосистем. В этих условиях возрастает роль математического моделирования. В статье рассмотрены возможности получения и использования различных математических моделей в математическом пакете *MatLab* для исследования распределительных электрических сетей, составляющих основу систем электроснабжения различных объектов.

Ключевые слова: системы электроснабжения, распределительные электрические сети, математическое моделирование, модель, схема замещения, передаточные функции, переменные состояния.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из этапов развития и совершенствования различных объектов военной инфраструктуры Министерства обороны Российской Федерации является создание для них новых и модернизация эксплуатируемых систем электроснабжения, от надежной работы которых зависит надежность, непрерывность и устойчивость функционирования их технических и технологических систем.

В соответствии с документом «Основные положения технической политики в электроэнергетике России на период до 2030 г.» процессы модернизации систем электроснабжения должны осуществляться на основе разработки и внедрения технических решений по построению электрических сетей с применением передовых энергоэффективных технологий. При этом предпочтение отдается инновационному сценарию развития, предусматривающему модернизацию электроэнергетики на основе новых принципов, которые приведут к созданию так называемой интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью.

Необходимо отметить, что инновационный сценарий развития электроэнергетической области в стране [1] неизбежно приведет к повсеместному применению оборудования с микропроцессорными устройствами управления, изменению принципиальных схем распределительных электрических сетей (РЭС) с учетом возможности применения управляемых статических средств регулирования режимов на базе современной силовой электроники. Кроме того, все устройства автоматизации должны быть цифровыми, они должны создаваться на современной микропроцессорной элементной базе, произведенной с использованием актуальных технологических норм. В соответствии с работой [2] алгоритмы программного обеспечения, используемого в этих устройствах, должны быть проверены на моделях энергосистем и в условиях опытных полигонов. Все проверки необходимо проводить до начала опытно-промышленной эксплуатации в энергосистеме.

В указанных условиях возрастает роль математического моделирования как эффективного средства анализа, прогнозирования и научного обоснования исследовательских, проектных и управленческих решений. При этом моделирование рассматривается как процесс исследования свойств различных системных объектов или явлений путем построения и изучения их математических моделей. Часто математические модели проще и удобнее использовать, чем натуральные (физические). Математические (компьютерные) модели, в силу своей логичности и строгого формального характера, позволяют выявить основные факторы, определяющие свойства изучаемых систем, и исследовать их реакции на внешние воздействия и изменения параметров. Вместе с тем в зависимости от поставленной задачи исследования могут использоваться различные аналитические и имитационные модели.

Учитывая, что основу систем электроснабжения различных объектов составляют распределительные электрические сети, на их примере рассмотрим возможности получения и применения различных математических моделей при однолинейном представлении электрической сети.

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Распределительные электрические сети представляют собой совокупность электроустановок для передачи и распределения электрической энергии и состоят из подстанций, распределительных устройств, токопроводов, воздушных и кабельных линий электропередачи, работающих на определенной территории [3].

Под математической моделью распределительной электрической сети понимают систему математических соотношений (функций, уравнений, неравенств, множеств, матриц, графов и т. д.), отражающих некоторые свойства объекта или процесса.

В связи с появлением различных инструментов моделирования, таких как *MatLab*, *MathCAD*, разработка имитационных моделей РЭС для исследования нормальных и аварийных режимов их работы становится весьма актуальной и достаточно просто реализуемой. Кроме того, данная задача имеет практическое значение при исследовании сложных РЭС, аналитическое описание которых весьма затруднительно [4, 5].

Рассмотрим фрагмент РЭС 10–0,4 кВ, однолинейная схема которой изображена на рис. 1.

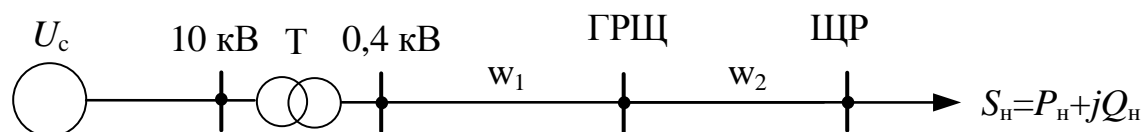


Рис. 1. Однолинейная схема распределительной электрической сети 10–0,4 кВ

В состав распределительной электрической сети входят:

- силовой трансформатор 10/0,4 кВ (Т);
- кабельная линия электропередачи от распределительного устройства 0,4 кВ до главного распределительного щита ГРЩ (w_1);
- кабельная линия электропередачи от ГРЩ до распределительного щита ЩР (w_2).

К распределительной электрической сети подключена нагрузка, номинальная мощность которой $S_n = P_n + jQ_n$.

Имитационная модель распределительной электрической сети может быть получена с помощью широко используемого в настоящее время программного продукта *MatLab* и его расширений *Simulink* и *SimPowerSystems*, предназначенных для моделирования электроэнергетических и электротехнических устройств. Блок *Powergui* в составе *SimPowerSystems* является инструментом графического интерфейса пользователя и обеспечивает решение ряда

важных в рассматриваемой области задач [5, 6]. Имитационная модель РЭС 10–0,4 кВ, соответствующая однолинейной схеме (рис. 1), полученная с использованием элементов библиотек *SimPowerSystems* и *Simulink*, представлена на рис. 2.

При моделировании реализуется принцип визуального программирования, в соответствии с которым из библиотеки стандартных блоков создается модель распределительной электрической сети и осуществляются необходимые расчеты.

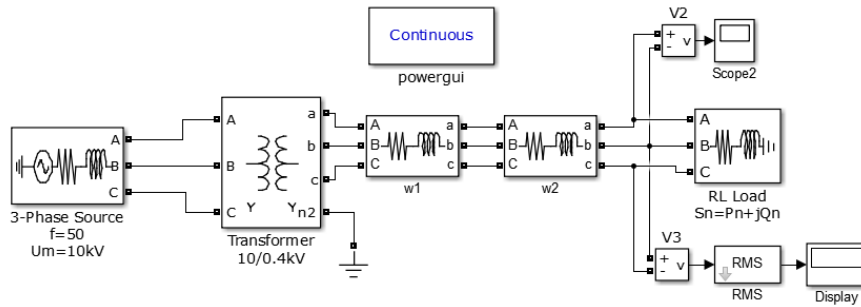


Рис. 2. Имитационная модель распределительной электрической сети 10–0,4 кВ

Кроме того, в отличие от «классических» способов моделирования не нужно досконально изучать язык программирования и численные методы математики, а достаточно общих знаний, требующихся при работе на компьютере и, естественно, знаний предметной области.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ НА ОСНОВЕ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ

Для исследования распределительных электрических сетей возможно применение математических моделей, полученных на основе схем замещения элементов РЭС [6]. Схема замещения рассматриваемой распределительной электрической сети с использованием упрощенных схем замещения элементов представлена на рис. 3.

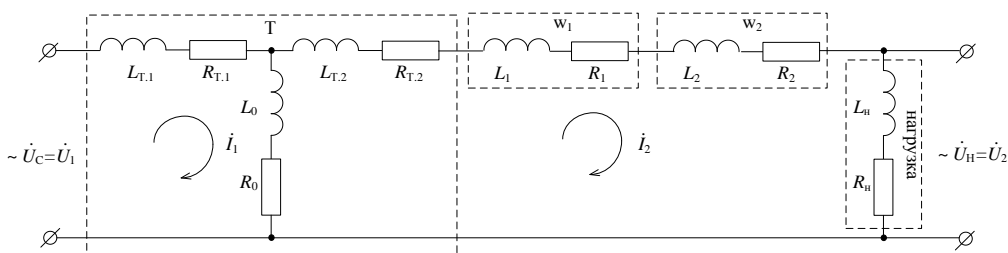


Рис. 3. Схема замещения распределительной электрической сети 10–0,4 кВ

В состав схемы замещения РЭС входят:

- Т-образная схема замещения двухобмоточного силового трансформатора Т, состоящая из элементов с параметрами первичной обмотки (активное сопротивление $R_{T,1}$ и индуктивность $L_{T,1}$), с параметрами вторичной обмотки (активное сопротивление $R_{T,2}$ и индуктивность $L_{T,2}$) и с параметрами цепи намагничивания (активное сопротивление R_0 и индуктивность L_0);
- схемы замещения кабельных линий электропередачи w_1 с параметрами (активное сопротивление R_1 и индуктивность L_1) и w_2 с параметрами (активное сопротивление R_2 и индуктивность L_2);
- схема замещения нагрузки с активным сопротивлением R_n и индуктивностью L_n .

Для представленной на рис. 3 схемы замещения по второму закону Кирхгофа составим следующие уравнения в комплексной форме с учетом принятых положительных направлений токов \dot{I}_1 и \dot{I}_2 :

$$(Z_{T.1} + Z_0)\dot{I}_1 - Z_0\dot{I}_2 = \dot{U}_1, \quad (1)$$

$$(Z_{T.2} + Z_1 + Z_2 + Z_H + Z_0)\dot{I}_2 - Z_0\dot{I}_1 = 0, \quad (2)$$

где

$$Z_{T.1} = R_{T.1} + j\omega L_{T.1}; \quad Z_{T.2} = R_{T.2} + j\omega L_{T.2}.$$

Здесь Z_0 – комплексные сопротивления обмоток и цепи намагничивания силового трансформатора, $Z_0 = R_0 + j\omega L_0$;

Z_1, Z_2 – комплексные сопротивления линий электропередачи, $Z_1 = R_1 + j\omega L_1$,
 $Z_2 = R_2 + j\omega L_2$;

Z_H – комплексное сопротивление нагрузки, $Z_H = R_H + j\omega L_H$.

Выходным напряжением модели является напряжение на нагрузке, которое определяется выражением

$$\dot{U}_2 = Z_H \dot{I}_2, \quad (3)$$

Уравнения (1)–(3) представляют математическую модель РЭС, полученную на основе ее схемы замещения.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ, ПОЛУЧЕННАЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПЕРАЦИОННОГО МЕТОДА

Математическая модель РЭС, характеризующая их динамические свойства, может быть представлена с помощью операционного метода в виде передаточной функции.

Для получения математической модели РЭС в виде комплексной передаточной функции выразим из уравнения (2) вторичный ток \dot{I}_2 через первичный \dot{I}_1 :

$$\dot{I}_2 = Z_0 / (Z_{T.2} + Z_1 + Z_2 + Z_H + Z_0) \dot{I}_1, \quad (4)$$

откуда

$$\dot{I}_2 / \dot{I}_1 = Z_0 / (Z_{T.2} + Z_1 + Z_2 + Z_H + Z_0). \quad (5)$$

Подставляя значение вторичного тока из выражения (4) в уравнение (1), получим

$$\dot{U}_1 = (Z_{T.1} + Z_0)\dot{I}_1 - \frac{Z_0^2}{(Z_{T.2} + Z_1 + Z_2 + Z_H + Z_0)} \dot{I}_1. \quad (6)$$

Комплексная передаточная функция силового трансформатора по напряжению определяется как следующее отношение:

$$W_U(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{\dot{I}_2 Z_H}{\dot{I}_1 ((Z_{T.1} + Z_0) - Z_0^2 / (Z_{T.2} + Z_1 + Z_2 + Z_H + Z_0))}. \quad (7)$$

Учитывая выражение (5), комплексная передаточная функция по напряжению будет иметь вид

$$\begin{aligned} W_U(j\omega) &= \frac{Z_0 Z_H}{(Z_{T.1} + Z_0)(Z_{T.2} + Z_1 + Z_2 + Z_H + Z_0) - Z_0^2} = \\ &= \frac{Z_0 Z_H}{Z_{T.1}(Z_{T.2} + Z_1 + Z_2 + Z_H + Z_0) - Z_0(Z_{T.2} + Z_1 + Z_2 + Z_H)} = \end{aligned}$$

$$= \frac{(R_0 + j\omega L_0)(R_H + j\omega L_H)}{(R_{T,1} + j\omega L_{T,1})(R_{T,2} + R_1 + R_2 + R_H + R_0 + j\omega(L_{T,1} + L_1 + L_2 + L_H + L_0)) + (R_0 + j\omega L_0)(R_{T,2} + R_1 + R_2 + R_H + j\omega(L_{T,1} + L_1 + L_2 + L_H))} \quad (8)$$

Учитывая, что $j\omega = p$, получим выражение для операторной передаточной функции

$$W_U(p) = \frac{U_2(p)}{U_1(p)} = \frac{k(T_1^2 p^2 + T_2 p + 1)}{T_3^2 p^2 + T_4 p + 1}, \quad (9)$$

где k – коэффициент передачи,

$$k = \frac{R_0 R_H}{R_{T,1}(R_{T,2} + R_1 + R_2 + R_H + R_0) + R_0(R_{T,2} + R_1 + R_2 + R_H)};$$

$T_1, T_2,$

T_3, T_4 – постоянные времени, при этом

$$T_1^2 = \frac{L_0 L_H}{R_0 R_H}; \quad T_2 = \frac{R_H L_0 + R_0 L_H}{R_0 R_H};$$

$$T_3^2 = \frac{L_{T,1}(L_{T,2} + L_1 + L_2 + L_H + L_0) + L_0(L_{T,2} + L_1 + L_2 + L_H)}{R_{T,1}(R_{T,2} + R_1 + R_2 + R_H + R_0) + R_0(R_{T,2} + R_1 + R_2 + R_H)};$$

$$T_4 = \frac{R_{T,1}(L_{T,2} + L_1 + L_2 + L_H + L_0) + L_{T,1}(R_{T,2} + R_1 + R_2 + R_H + R_0) + L_0(R_{T,2} + R_1 + R_2 + R_H) + R_0(L_{T,2} + L_1 + L_2 + L_H)}{R_{T,1}(R_{T,2} + R_1 + R_2 + R_H + R_0) + R_0(R_{T,2} + R_1 + R_2 + R_H)}$$

Из передаточной функции (9) можно получить выражение для U_2 , которое формально можно рассматривать как форму записи дифференциального уравнения с помощью передаточной функции, описывающего рассматриваемую систему:

$$U_2 = W_U(p)U_1 = k(T_1^2 p^2 + T_2 p + 1) \frac{U_1}{T_3^2 p^2 + T_4 p + 1}. \quad (10)$$

Применение передаточных функций позволяет на практике решать задачи анализа и синтеза динамических систем и использовать структурные схемы для установления связей между их элементами. Частотные передаточные функции, получаемые из операторных передаточных функций путем замены $p = j\omega$, используются для исследования динамических систем в частотной области.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ В ПЕРЕМЕННЫХ СОСТОЯНИЯ

Для исследования динамических систем во временной области, как правило, переходят к математическому описанию с использованием переменных состояния.

В общем случае динамическая система в непрерывном времени может быть описана парой матричных уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{X}} &= \mathbf{F}[\mathbf{X}, \mathbf{U}, t], \\ \mathbf{Y} &= \mathbf{Q}[\mathbf{X}, \mathbf{U}, t], \end{aligned}$$

где \mathbf{F} – n -мерная вектор-функция системы;

\mathbf{Q} – m -мерная вектор-функция выхода;

\mathbf{X} – n -мерный вектор переменных состояния;

\mathbf{U} – r -мерный вектор входных переменных;

Y – m -мерный вектор выходных переменных;
 t – время.

Для построения математической модели РЭС в переменных состояния, учитывая вид передаточной функции (9), воспользуемся методом прямого программирования [8]. Представим полученное дифференциальное уравнение (10) в виде системы дифференциальных уравнений первого порядка. Для этого запишем его следующим образом:

$$U_2 = (T_1^2 p^2 + T_2 p + 1) \frac{kU_1}{T_3^2 p^2 + T_4 p + 1} = (T_1^2 p^2 + T_2 p + 1)e \tag{11}$$

или

$$U_2 = T_1^2 \ddot{e} + T_2 \dot{e} + e, \tag{12}$$

где $e = \frac{kU_1}{T_3^2 p^2 + T_4 p + 1}$.

Отсюда получим уравнение для переменной e

$$T_3^2 \ddot{e} + T_4 \dot{e} + e = kU_1 \tag{13}$$

или

$$\ddot{e} = -\frac{T_4}{T_3^2} \dot{e} - \frac{1}{T_3^2} e + \frac{kU_1}{T_3^2}. \tag{14}$$

В правой части уравнений (14) имеются слагаемые, зависящие от e и \dot{e} . Для их получения можно дважды проинтегрировать переменную \ddot{e} . Структурная схема системы, составленная по уравнению (14) с учетом (12), изображена на рис. 4.

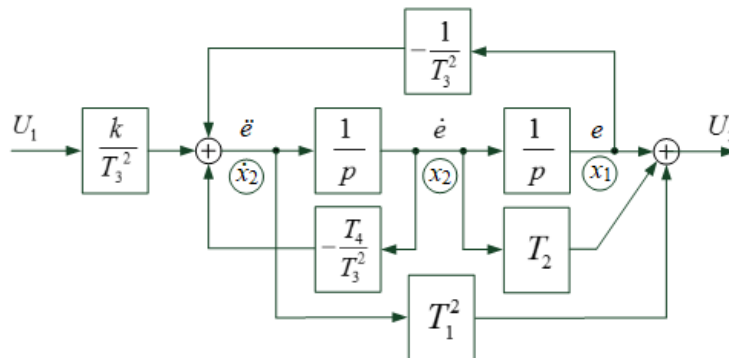


Рис. 4. Структурная схема распределительной электрической сети в переменных состояния

Из схемы видно, что для моделирования уравнения (10) можно обойтись без дифференцирующих звеньев.

Для переменных состояния введем обозначения:

$$x_1 = e; x_2 = \dot{e}. \tag{15}$$

Теперь уравнение (14) можно записать в виде системы уравнений первого порядка:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 = 0 \cdot x_1 + 1 \cdot x_2 + 0 \cdot U_1 \\ \dot{x}_2 &= -\frac{1}{T_3^2} x_1 - \frac{T_4}{T_3^2} x_2 + \frac{k}{T_3^2} \cdot U_1 \end{aligned} \right\} \tag{16}$$

Из уравнений (12) и (15) следует, что выходная переменная

$$U_2 = x_1 + T_2 x_2 + T_1^2 \dot{x}_2 + 0 \cdot U_1, \tag{17}$$

или

$$U_2 = (1 - \frac{T_1^2}{T_3^2})x_1 + (T_2 - \frac{T_1^2 T_4}{T_3^2})x_2 + \frac{k T_1^2}{T_3^2} U_1. \tag{18}$$

Таким образом, режим функционирования распределительной электрической сети описан двумя уравнениями состояния (16) и одним уравнением (18).

В матричной форме записи

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U}, \quad \mathbf{Y} = \mathbf{C}\mathbf{X} + \mathbf{D}\mathbf{U}$$

уравнениям (14) и (16) соответствуют следующие векторы и матрицы:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{T_3^2} & -\frac{T_4}{T_3^2} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{k}{T_3^2} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{U} = [U_1]; \quad \mathbf{Y} = [U_2]; \quad \mathbf{C} = \left[1 - \frac{T_1^2}{T_3^2} \quad T_2 - \frac{T_1^2 T_4}{T_3^2} \right]; \quad \mathbf{D} = \left[\frac{k T_1^2}{T_3^2} \right].$$

Следует отметить, что переменные состояния, описывающие рассматриваемую систему, могут выбираться не единственным образом. Всегда можно выбрать альтернативную комбинацию таких переменных.

АНАЛИЗ АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛЕЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Будем рассматривать имитационную модель (см. рис. 2) в качестве эталонной модели, процессы в которой с достаточной степенью достоверности соответствуют процессам в распределительной электрической сети (см. рис. 1).

Для установления адекватности полученных математических моделей (степени их соответствия имитационной модели) использовано сравнение их результатов моделирования, полученных при одинаковых условиях.

Моделировался режим работы силового трансформатора под нагрузкой. В модели силового трансформатора использовались параметры трансформатора типа ТМ-1000/10: потери холостого хода составили $\Delta P_{xx} = 1,4$ кВт, потери короткого замыкания – $\Delta P_{кз} = 10,8$ кВт, напряжение короткого замыкания – $U_{кз} = 5,5\%$, номинальный ток холостого хода – $I_{xx} = 0,6\%$. Параметры нагрузки были следующие: $P_n = 350$ кВт, $Q_n = 150$ кВАр.

Имитационная модель работы силового трансформатора под нагрузкой представлена на рис. 5.

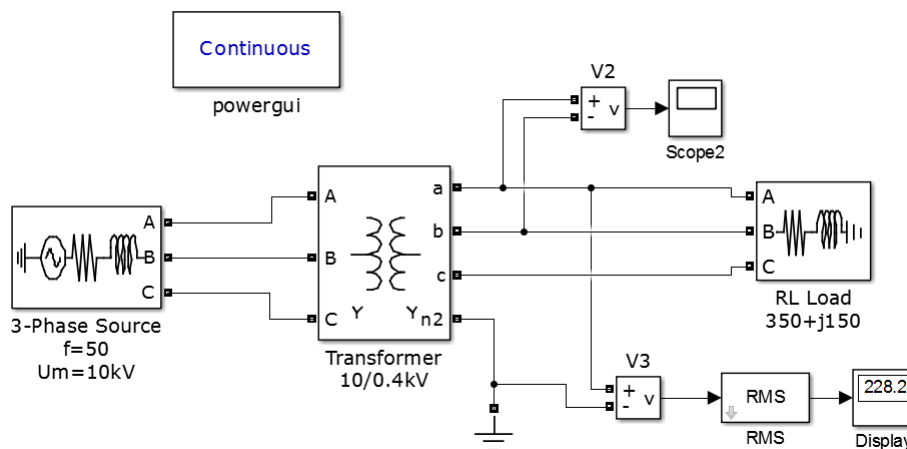


Рис. 5. Имитационная модель работы силового трансформатора под нагрузкой

На рис. 6 показана математическая модель РЭС, полученная с использованием элементов библиотеки *Simulink* и соответствующая схеме замещения (см. рис. 3).

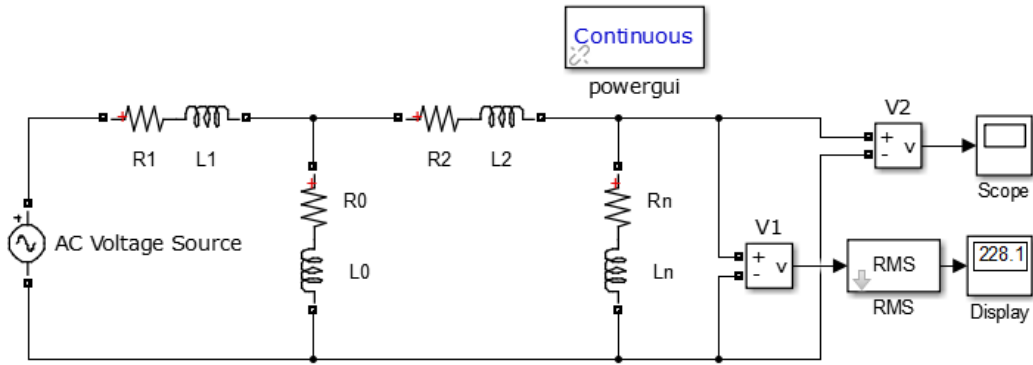


Рис. 6. Модель распределительной электрической сети 10–0,4 кВ в среде Simulink, полученная на основе схемы замещения

Параметры модели на основе схемы замещения трансформатора ТМ-1000/10 получены по известным соотношениям [9]: $R_1 = 1,08 \text{ Ом}$; $L_1 = 17 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$; $R_2 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$; $L_2 = 27 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$; $R_0 = 19 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$; $L_0 = 91 \cdot 10^{-5} \text{ Гн}$; нагрузка – $R_n = 0,46 \text{ Ом}$; $L_n = 3,4 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$.

На рис. 7 представлена математическая модель распределительной электрической сети 10–0,4 кВ с использованием передаточной функции (9), на рис. 8 – математическая модель в переменных состояния.

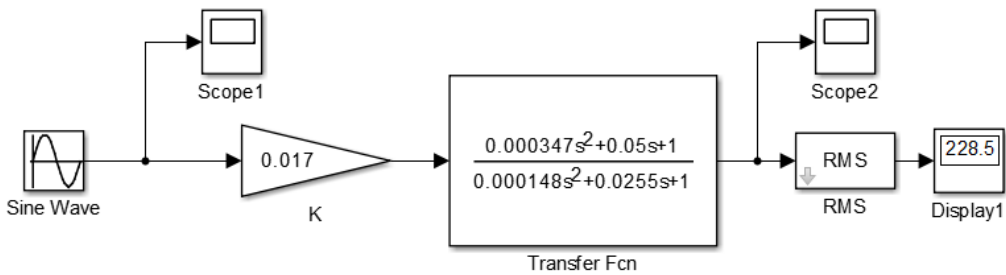


Рис. 7. Математическая модель распределительной электрической сети 10–0,4 кВ в среде Simulink с использованием передаточной функции

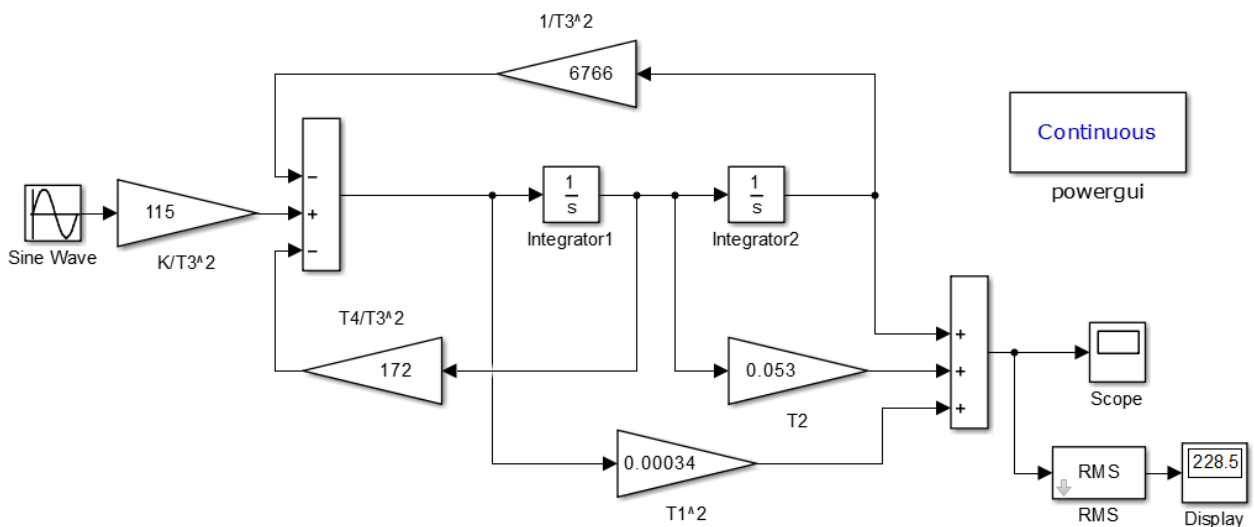


Рис. 8. Математическая модель распределительной электрической сети 10–0,4 кВ в переменных состояния в среде Simulink

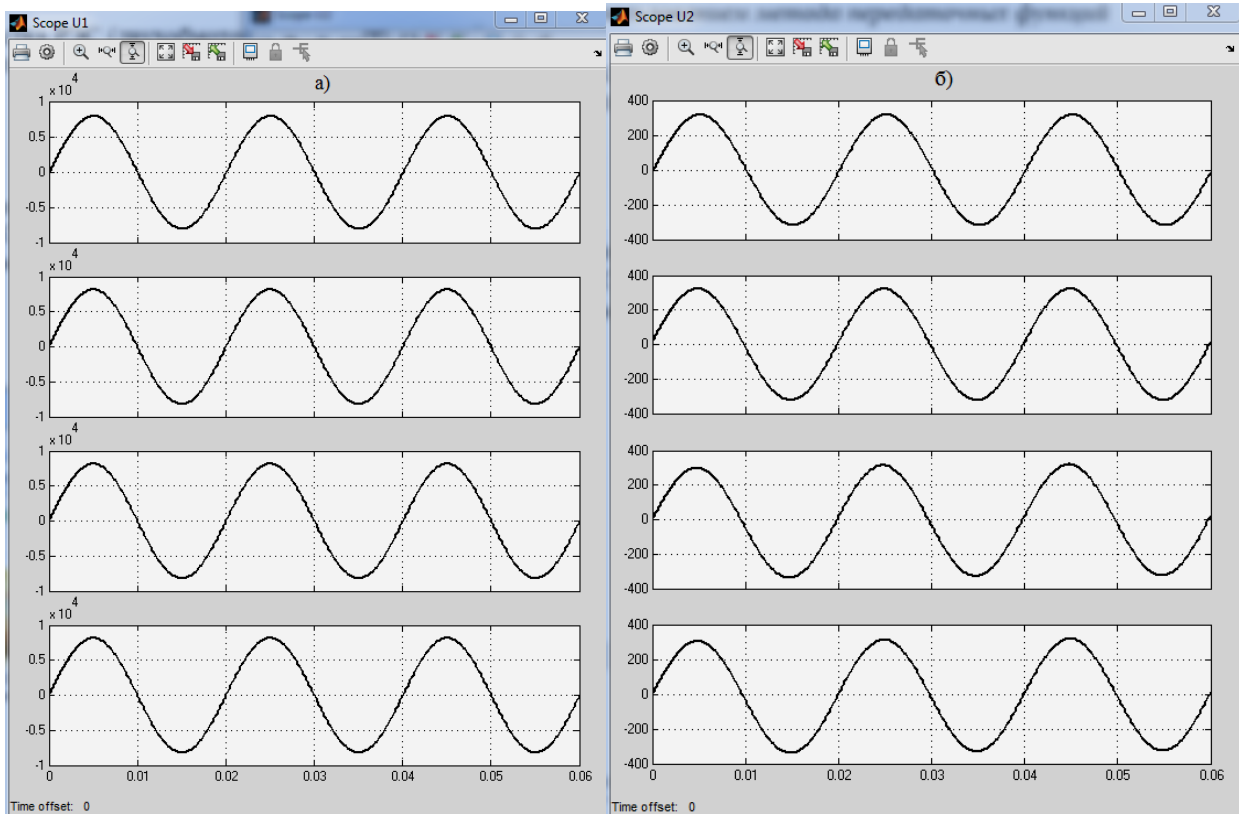


Рис. 9. Результаты моделирования выходных напряжений для рассматриваемых моделей (имитационной модели, модели на основе схемы замещения, модели с использованием передаточной функции, модели в переменных состояниях) РЭС:
а – входного напряжения U_1 ; б – выходного напряжения U_2

Результаты моделирования режима работы силового трансформатора под нагрузкой, представленные на рис. 9, свидетельствуют об адекватности полученных моделей. При одинаковых по амплитуде и фазе гармонических сигналах на входах всех рассматриваемых моделей выходные гармонические сигналы имеют одинаковые амплитуды и фазы.

Рассмотренные типы имитационных и математических моделей могут применяться:

- для решения различных задач расчета и проектирования как отдельных элементов, так и систем электроснабжения в целом;
- для анализа установившихся и динамических процессов в них;
- для оптимизации параметров устройств и систем.

При этом использование той или иной математической модели будет определяться в первую очередь содержанием решаемой задачи, для которой построенная модель будет наилучшим образом описывать исследуемую систему.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях инновационного сценария развития электроэнергетики существенно возрастает роль математического моделирования, направленного на исследование свойств различных системных объектов с помощью построения и изучения их моделей. При этом следует учитывать, что создание одной модели, с помощью которой можно было бы решать разнообразные задачи, невозможно. Выбирая метод для построения модели, а следовательно, и тип модели, необходимо учитывать содержательную постановку задачи, ее специфику, особенности набора исходных данных, вид результатов, которые требуется получить в ходе решения.

Список используемых источников

1. Направления развития систем электроснабжения специальных объектов в условиях реализации инновационного сценария развития электроэнергетики / В. В. Карагодин [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – Вып. 3. – С. 168–173.
2. Основные положения (Концепция) технической политики в электроэнергетике России на период до 2030 г. – М. : ОАО РАО «ЕЭС России», 2008. – 90 с.
3. Пешехонов Н. Е., Рыбаков В. В., Рыбаков Д. В. Системы электроснабжения специальных объектов : учеб. пособие. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2019. – 173 с.
4. Карагодин В. В., Рыбаков Д. В., Полянский К. А. Исследование распределительных электрических сетей, содержащих устройства компенсации реактивной мощности и нелинейные нагрузки, с помощью математического пакета MATLAB // Вестник Санкт-Петербургского отделения Академии инженерных наук. – СПб. : Ун-т ИТМО, 2015. – Вып. № 11. – С. 151–161.
5. Карагодин В. В., Ревяков Б. А., Рыбаков Д. В. Исследование аварийных режимов работы систем электроснабжения объектов военной инфраструктуры с помощью математического пакета MatLab // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2022. – Вып. 681. – С. 89–96.
6. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М. : ДМК Пресс; СПб. : Питер, 2008. – 288 с.
7. Герасименко А. А., Федин В. Т. Передача и распределение электрической энергии : учеб. пособие. – 4-е изд., стер. – М. : КНОРУС, 2020. – 648 с.
8. Теория автоматического управления. Линейные системы автоматического управления : учеб. пособие / А. Н. Герасимов [и др.]. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2014. – 215 с.
9. Конюхова Е. А. Электроснабжение объектов : учеб. пособие. – М. : изд-во «Мастерство»; Высш. шк., 2001. – 320 с.

В. В. Карагодин,
доктор технических наук, профессор;
Б. А. Ревяков,
кандидат технических наук, доцент;
Д. В. Рыбаков,
кандидат технических наук

ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ ПЕРЕВОДА РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ СПЕЦИАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ НА НАПРЯЖЕНИЕ 20 кВ

В статье обоснована необходимость перевода распределительных электрических сетей специальных объектов с напряжения 6, 10 кВ на напряжение 20 кВ. Приведены расчеты сравнительного анализа. Показаны основные преимущества распределительных электрических сетей напряжением 20 кВ, а именно увеличение пропускной способности распределительных электрических сетей, снижение потерь мощности и энергии на ее транспортирование, расширение зоны возможного размещения трансформаторных подстанций потребителей, обеспечение максимального удаления специального объекта от источника питания и тем самым повышение живучести распределительных электрических сетей и надежности их функционирования.

Ключевые слова: распределительная электрическая сеть, напряжение, кабельные линии электропередачи, потери мощности.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях современной военно-политической обстановки к числу основных задач развития систем вооружения относится повышение их живучести и боевой устойчивости. Это, в свою очередь, обуславливает необходимость обеспечения выполнения жестких требований к энерговооруженности, надежности электроснабжения технических комплексов и средств наземного базирования (в дальнейшем – специальные объекты) в различных условиях обстановки.

Основу систем электроснабжения специальных объектов составляют распределительные электрические сети (РЭС), характеризующиеся наличием потерь электрической энергии в линиях и трансформаторах. Анализ технического состояния систем электроснабжения ряда специальных объектов показывает, что их распределительные электрические сети введены в эксплуатацию во второй половине XX века и за время эксплуатации практически не модернизировались, а подвергались лишь незначительным доработкам. Так, например, на 1 ГИК МО РФ ряд трансформаторных подстанций находятся в эксплуатации более 40 лет. Их действующее оборудование имеет значительный физический износ, оно технологически и морально устарело, а линии электропередачи имеют высокий уровень потерь. Большинство трансформаторов не оборудованы автоматическими регуляторами напряжения под нагрузкой. Это привело к некоторому отставанию уровня развития существующих РЭС специальных объектов от уровня качественно новой технологической и технической базы потребителей электроэнергии, что влечет за собой снижение надежности электроснабжения и, как следствие, может привести к снижению готовности специальных объектов к выполнению задач по предназначению [1, 2]. Все это свидетельствует о том, что реконструкция систем электроснабжения специальных объектов на сегодняшний день становится все более актуальной задачей.

Учитывая, что в качестве основного оборудования систем электроснабжения специальных объектов, как правило, используется общепромышленное оборудование, то определение основных количественных и качественных параметров развития распределительных электри-

ческих сетей специальных объектов необходимо координировать с направлениями технической политики в электроэнергетике России [3–5]. В соответствии с этой политикой процессы реконструкции и модернизации систем электроснабжения должны осуществляться на основе разработки и внедрения технических решений по построению электрических сетей с применением передовых энергоэффективных технологий, обеспечивающих вывод из эксплуатации выработавшего технический ресурс и/или морально устаревшего, экономически неэффективного оборудования и направленных на снижение потерь в электрических сетях.

Одним из возможных направлений развития систем электроснабжения специальных объектов является перевод их распределительных электрических сетей на более высокие классы напряжений [3].

ВЛИЯНИЕ УРОВНЯ НАПРЯЖЕНИЯ РЭС НА ВЕЛИЧИНУ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Одним из перспективных способов снижения потерь мощности и электрической энергии в электрической сети является перевод распределительных электрических сетей с используемых в настоящее время 6, 10 кВ на более высокий класс напряжения 20 кВ. Положительный опыт применения сетей 20 кВ уже имеется в некоторых странах мира – Австрии, Германии, Италии и др. [6], а также в России при строительстве инновационного центра «Сколково» [7].

Для оценки преимущества перехода на более высокий класс напряжения проведем сравнительный анализ удельных потерь мощности (активной составляющей) в кабельных линиях 6, 10 и 20 кВ на примере участка распределительной электрической сети, схема которого представлена на рис. 1. Трансформаторная подстанция (ТП) 6(10,20)/0,4 кВ получает питание от сетевой понизительной подстанции (СПП) 110/6(10,20) кВ. В качестве кабельной линии электропередачи (КЛЭП) используется кабель с алюминиевыми жилами сечением 95 мм².

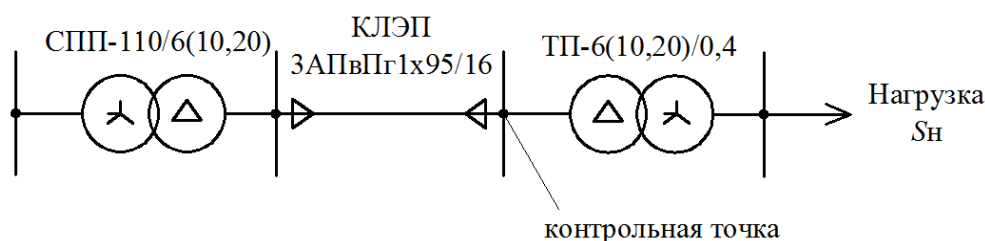


Рис. 1. Схема участка распределительной электрической сети

Потери активной мощности в линиях электропередачи трехфазного переменного тока определяются следующим выражением:

$$\Delta P = 3I^2 R; \quad (1)$$

где I – ток нагрузки;

R – активное сопротивление линии электропередачи.

Ток в линии обуславливается передачей полной мощности нагрузки S_H , которая определяется формулой

$$S_H = \sqrt{P_H^2 + Q_H^2}, \quad (2)$$

где P_H и Q_H – активная и реактивная составляющие нагрузки соответственно.

Подставляя в формулу потерь (1) значение тока, выраженное через мощность

$$I = \frac{S_H}{\sqrt{3} U}, \quad (3)$$

где U – линейное напряжение, получаем

$$\Delta P = 3 \left(\frac{S_n}{\sqrt{3} U} \right)^2 R = \frac{S_n^2}{U^2} R = \frac{P_n^2 + Q_n^2}{U^2} R. \quad (4)$$

Расчитанные значения удельных потерь мощности в кабельных линиях 6, 10 и 20 кВ в зависимости от величины передаваемой мощности сведены в табл. 1.

Таблица 1

Анализ удельных потерь мощности в кабелях 6, 10 и 20 кВ

Мощность трансформатора ТП, кВт	Удельные потери мощности, кВт/км		
	6 кВ	10 кВ	20 кВ
400	1,4	0,5	0,1
630	3,5	1,3	0,3
1000	8,9	3,2	0,8
1250	13,9	5,0	1,3
1600	22,8	8,2	2,1
2500	55,6	20,0	5,0

Анализ результатов показывает, что удельные потери мощности в КЛЭП напряжением 20 кВ в 4 раза меньше, чем в КЛЭП напряжением 10 кВ и в 10 раз меньше, чем в КЛЭП напряжением 6 кВ (рис. 2).

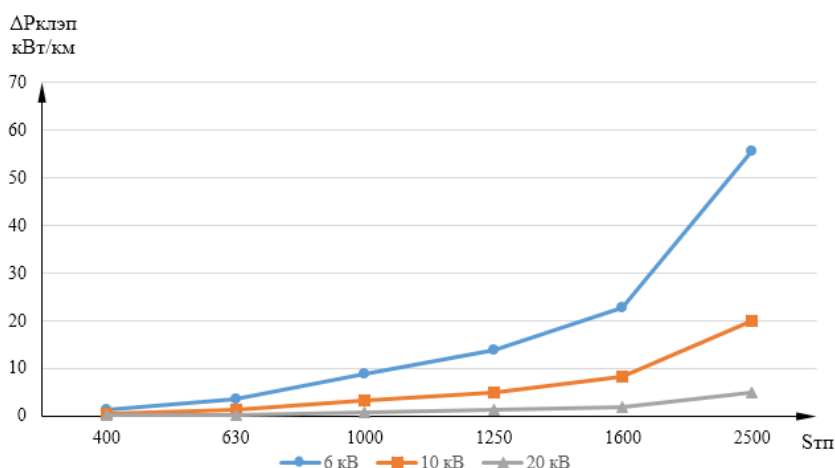


Рис. 2. Зависимость удельных потерь мощности в РЭС от передаваемой мощности

Кроме того, перевод распределительных электрических сетей на более высокий класс напряжения приведет к уменьшению токов нагрузки, что, в свою очередь, позволит выбрать КЛЭП с меньшим сечением проводника, а следовательно, изменятся и удельные активные сопротивления КЛЭП.

Аналитическое отношение потерь удельной мощности в КЛЭП различного класса напряжения U_1 , U_2 и сечения можно представить следующим выражением:

$$\frac{\Delta P_{U_1}}{\Delta P_{U_2}} = \frac{R_{01}/R_{02}}{(U_1/U_2)^2}, \quad (5)$$

где R_{01} и R_{02} — активные сопротивления кабельных линий электропередачи различного класса напряжения и сечения.

Например, так как сечение проводов для КЛЭП напряжением 10 кВ и 20 кВ может отличаться в 2-3 раза, то при передаче одной и той же мощности по ним отношение удельных потерь мощности ΔP_{10} и ΔP_{20} будет находиться в пределах 1,3–1,6. То есть удельные потери мощности в КЛЭП напряжением 20 кВ будут в 1,5 раза меньше, чем в КЛЭП напряжением 10 кВ.

Кроме того, предложенный подход перевода распределительных электрических сетей на более высокие классы напряжений может позволить сократить для объектов, размещенных на больших площадях, число крупных трансформаторных подстанций (ТП-110/35 кВ), что приведет к сокращению потери мощности и энергии на трансформацию в среднем на 5–7% [8].

ВЛИЯНИЕ УРОВНЯ НАПРЯЖЕНИЯ РЭС НА ЗОНУ ВОЗМОЖНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПОДСТАНЦИЙ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ СПЕЦИАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

Важнейшим показателем совершенства РЭС специальных объектов наряду с потерями является качество электрической энергии, которое характеризуется в распределительных электрических сетях главным образом значением такого параметра режима СЭС, как напряжение U в точке присоединения потребителей. Переход на более высокие классы напряжений дает возможность осуществить передачу электроэнергии на большие расстояния, сохраняя при этом заданные уровни напряжения. Данное обстоятельство является немаловажным аргументом в пользу перевода РЭС специальных объектов на напряжение 20 кВ, так как позволяет расширить зоны возможного размещения трансформаторных подстанций потребителей. Удаление трансформаторных подстанций критически важных объектов от центров питания (в рассматриваемом случае от СПП) позволяет уменьшить вероятность воздействия противника, обеспечивая надежность и живучесть как СПП, так и РЭС специальных объектов.

Аналитическим путем можно определить максимальную длину кабельной линии электропередачи для сетей напряжением 6, 10 и 20 кВ (радиус зоны возможного размещения ТП потребителей) для передачи по ней единицы мощности при условии, что потери напряжения не превышают величины 10%.

Потери напряжения на высоковольтном участке сети определяются выражением

$$\Delta U = \frac{P_n R_0 + Q_n X_0}{U} l, \quad (6)$$

где R_0 и X_0 – удельные активное и индуктивное сопротивления кабельных линий электропередачи;

l – длина рассматриваемого участка КЛЭП.

Учитывая, что в распределительных электрических сетях удельное активное сопротивление больше реактивного, для оценочных расчетов можно пренебречь индуктивным сопротивлением кабельной линии электропередачи. Тогда выражение (6) примет вид

$$\Delta U = \frac{P_n R_0}{U} l. \quad (7)$$

Потери напряжения (в %)

$$\Delta U_{\%} = \frac{P_n R_0}{U^2} l \cdot 100. \quad (8)$$

Из полученного выражения можно определить максимальную длину кабельной линии электропередачи (радиус зоны возможного размещения ТП потребителей):

$$l = \frac{\Delta U_{\%} U^2}{100 P_n R_0}. \quad (9)$$

Расчеты максимальных длин кабельных линий электропередачи в зависимости от фиксированного уровня потерь 10% и уровня напряжений на шинах потребителей (6, 10 или 20 кВ) представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Максимальные длины КЛЭП в зависимости
от фиксированного уровня потерь и уровня напряжений
на шинах потребителей**

Потери напряжения ΔU , %	Максимальная длина КЛЭП, км		
	6 кВ	10 кВ	20 кВ
1	1,1	3,1	12,5
2	2,3	6,3	25,0
3	3,4	9,4	37,5
4	4,5	12,5	50,0
5	5,6	15,6	62,5
6	6,8	18,8	75,0
7	7,9	21,9	87,5
8	9,0	25,0	100,0
9	10,1	28,1	112,5
10	11,3	31,3	125,0

Анализ полученных данных показывает, что 1 МВт мощности по кабелю с алюминиевыми жилами сечением 95 мм² с потерями не более 10% в распределительной электрической сети 6 кВ можно передать на максимальное расстояние 11,3 км, в сети 10 кВ – 31,3 км, а в сети 20 кВ – 125 км (рис. 3).

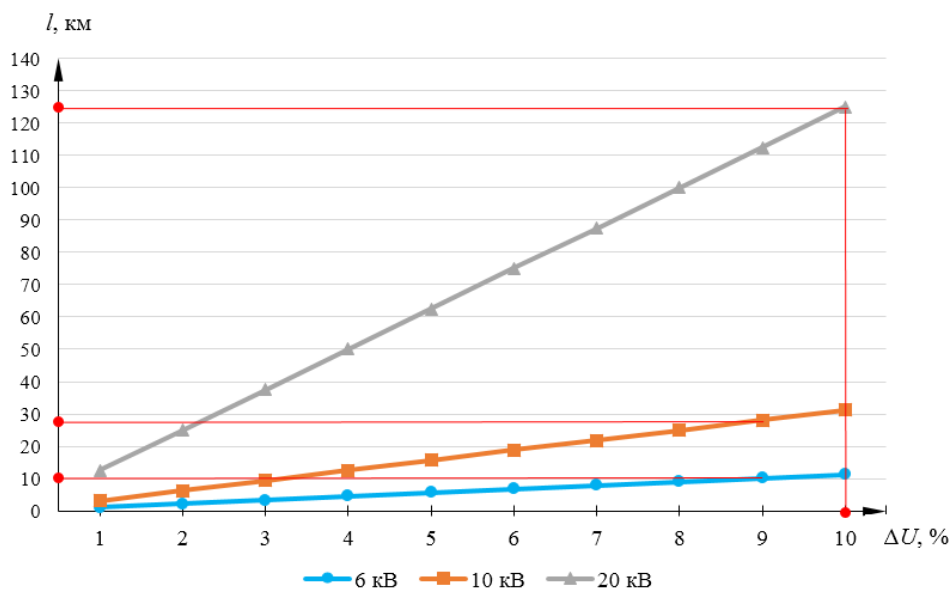


Рис. 3. Зависимость максимальных длин кабельных линий электропередачи от уровня потерь и уровня напряжений на шинах потребителей

Таким образом, переход от сетей напряжения 6, 10 кВ на сети напряжением 20 кВ позволит в 4–10 раз увеличить зону возможного размещения трансформаторных подстанций потребителей специальных объектов, что обеспечит переход к новым принципам построения

систем электроснабжения специальных объектов, повышение живучести РЭС и их надежное функционирование.

Следует отметить, что в последние годы в связи признанием перспективности данного подхода (например, в Московской энергосистеме на среднесрочную перспективу рассматривается применение напряжения 20 кВ) возрастает спрос на электрооборудование для класса напряжения 20 кВ и, как следствие, возрастает и предложение. На рынке электрооборудования появились производители трансформаторов, комплектных трансформаторных подстанций различной конфигурации, ячеек комплектных распределительных устройств на напряжение 20 кВ. С точки зрения схем и компоновки распределительных устройств 20 кВ и 6 (10) кВ относятся к сетям одного класса. Оборудование на 20 кВ (трансформаторы, выключатели, шкафы комплектных распределительных устройств) является комплектным, компактным и по размерам сопоставимо с оборудованием 6 (10) кВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Переход распределительных электрических сетей на класс напряжения 20 кВ позволит:

- увеличить пропускную способность распределительных электрических сетей, что немаловажно в условиях роста потребления электрической энергии специальными объектами;
- снизить потери мощности электроэнергии при ее транспортировании по распределительным электрическим сетям;
- расширить зону возможного размещения трансформаторных подстанций потребителей, обеспечив максимальное удаление специального объекта от источника питания, тем самым повысить живучесть РЭС и надежность их функционирования.

Список используемых источников

1. Карагодин В. В., Рыбаков Д. В. Оптимизация размещения устройств компенсации реактивной мощности в распределительных электрических сетях // Вопросы электромеханики. – 2015. – Т. 144. – С. 42–49.
2. Направления развития систем электроснабжения специальных объектов в условиях реализации инновационного сценария развития электроэнергетики / В. В. Карагодин [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – Вып. 3. – С. 168–173.
3. Основные положения (Концепция) технической политики в электроэнергетике России на период до 2030 г. – М. : ОАО РАО «ЕЭС России», 2008. – 90 с.
4. Программа инновационного развития ПАО «ФСК ЕЭС» на 2016-2020 годы с перспективой до 2025 года. – URL: http://www.fsk-ees.ru/innovation/innovative_development/innovative_development_program (дата обращения: 10.07.2019).
5. Основные положения концепции интеллектуальной энергосистемы с активно-адаптивной сетью. – URL: http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/ies_aas.pdf (дата обращения: 18.10.2019).
6. Borscevskis O. 20kV Voltage Adaptation Problems in Urban Electrical Networks. – URL: <http://egdk.ttu.ee> (дата обращения: 10.11.2022).
7. Создание интеллектуальной распределительной сети 20/0,4 кВ на территории инновационного центра «Сколково». – URL: <http://glavt.ru/projects/elektroenergetika/sozdanieintellektualnoy-raspredelitelnoy-seti-20-0-4-kv-na-territorii-skolkovo/> (дата обращения: 17.10.2022).
8. Миквельман Д. А. Применение напряжения класса 20 кВ в распределительных сетях // Молодой ученый : междунар. науч. журн. – 2021. – № 22 (364), ч. 2. – С. 112–114.

К. А. Крупский,
кандидат технических наук, доцент;
Е. А. Прокопенко,
кандидат технических наук, доцент;
С. Г. Хлебников,
кандидат военных наук, доцент;
В. А. Чернявский,
кандидат технических наук

МЕТОДИКА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО ОБОСНОВАНИЯ ПРЕДЕЛЬНЫХ СРОКОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЗВРАЩАЕМЫХ СТУПЕНЕЙ РАКЕТ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ ТАНДЕМНОЙ СХЕМЫ

Переход к ракетам космического назначения, имеющим в своем составе возвращаемые ступени ракеты-носителя, позволит, с одной стороны, сократить расходы на производство этих ступеней, а с другой – возникнет необходимость в проведении дополнительных технологических операций, связанных с послепусковым обслуживанием узлов возвратившейся ступени. Таким образом, возникает ситуация, при которой необходимо проведение технико-экономического анализа процесса использования возвращаемых ступеней вместо применения традиционных схем. В данной статье представлена методика технико-экономического обоснования использования возвращаемых ступеней ракет космического назначения с учетом сроков их эксплуатации по критерию минимума затрат. Разработанная методика позволяет обосновать предельные сроки использования для ракет космического назначения тандемной схемы, но может быть доработана и для пакетной схемы компоновки ступеней ракеты-носителя. Полученные результаты расчета затрат на вывод одного килограмма полезной нагрузки на целевую орбиту (с использованием системы спасения первой ступени и без нее) позволили обосновать предельные сроки эксплуатации возвращаемых ступеней.

Ключевые слова: технико-экономическое обоснование, ракета космического назначения, возвращаемая ступень.

ВВЕДЕНИЕ

Снижение затрат (временных и ресурсных) на запуск и эксплуатацию космических средств является одной из важнейших задач в интересах развития современной космонавтики. В настоящее время возобновился интерес к возможности повторного или многократного использования не только орбитальных средств, но и блоков ракет космического назначения (РКН) для выполнения космических грузоперевозок. Не последнюю роль в возрастании интереса к данному направлению сыграли успешные полеты ракет-носителей *Falcon 9* частной компании *SpaceX*, добившейся снижения удельной стоимости выведения полезного груза на околоземную орбиту [1–4].

Как и в зарубежных странах, в Российской Федерации реализуются планы по созданию многократных РКН. Результаты технико-экономического анализа показывают преимущества многократных блоков ракет. Так, расчеты, проведенные специалистами Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана, показали, что стоимость запуска с повторно используемой первой ступенью снижается на 20–30%, а при увеличении частоты запусков их стоимость может быть сокращена более чем на 50% [5].

Следует отметить, что помимо снижения стоимости выведения полезного груза повторное применение блоков ракет-носителей позволяет сократить общую стоимость и время производства и подготовки РКН к пуску ввиду того, что нет необходимости в изготовлении узлов и агрегатов, используемых повторно (корпусов, двигательных установок, топливных баков и т. д.).

Однако после пуска таких РКН возникает необходимость в проведении дополнительных технологических операций, связанных с послепусковым обслуживанием узлов и агрегатов возвратившейся ступени. Количество этих технологических операций будет только увеличиваться, а обслуживание узлов и агрегатов будет усложняться после каждого проведенного пуска РКН. Также дополнительно необходимо учесть затраты на систему спасения возвращаемых ступеней РКН. Все эти факторы неизбежно приведут к удорожанию этапов жизненного цикла РКН и повышению стоимости полезного груза. Поэтому разработка методики, позволяющей на основе стоимостных показателей создания и использования многоразовых ступеней РКН оценить предельные сроки эксплуатации РКН, является актуальной научной задачей [6].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Если известна стоимость одноразовой ступени C^{op} РКН, а стоимость многоразовой ступени состоит из двух частей – стоимости собственно ступени C_o и стоимости ее восстановления после очередного полета ΔC_B , то замена одноразовой ступени на многоразовую имеет смысл при выполнении следующего условия:

$$C_o + \Delta C_B \gg C^{op}.$$

Тогда следует рассмотреть условие использования ракеты-носителя (РН) с многоразовыми ступенями для развертывания орбитальной группировки заданного состава либо при заданной интенсивности выведения космических аппаратов на требуемом интервале времени T . Например, во втором случае задачу о замене одноразовой ступени РКН на многоразовую можно поставить следующим образом.

Пусть известна ставка дисконтирования r , под которую планируются финансовые затраты на весь период T . Тогда применение многоразовой ступени будет экономически эффективно, если будет выполнено условие

$$C_o + \sum_{i=0}^{\lambda T} \frac{\Delta C_B(i)}{[1+r(i)]^i} < C^{op} \sum_{i=0}^{\lambda T} \frac{1}{[1+r(i)]^i}, \quad (1)$$

где i – номер повторного применения ступени.

Следует отметить, что ставки дисконтирования затрат на интервале времени T для РКН с одноразовой и многоразовой ступенями будут отличаться.

Очевидно, что выражение (1) можно представить в следующем виде:

$$C_o < \sum_{i=0}^{\lambda T} \frac{C^{op} - \Delta C_B(i)}{[1+r(i)]^i}. \quad (2)$$

Если допустить экспоненциальный рост расходов на восстановительные работы многоразовой ступени, то можно представить:

$$\Delta C_B(i) \approx \Delta C_{B0} [1+S(i)]^i,$$

где $S(i)$ – интенсивность роста расходов;

ΔC_{B0} – базовые расходы.

Тогда формула (2) приобретает следующий вид:

$$C_o < \sum_{i=0}^{\lambda T} \frac{C^{op} - \Delta C_{B0} [1+S(i)]^i}{[1+r(i)]^i}. \quad (3)$$

Однако расчеты в правой части формулы (3) возможны только численными методами. Для получения аналитических зависимостей, необходимых для оценочных расчетов, можно воспользоваться приемом представления дискретных функций непрерывными дифференциальными уравнениями.

ОПИСАНИЕ РАЗРАБОТАННОЙ МЕТОДИКИ

Решение задачи технико-экономического обоснования предельных сроков использования возвращаемых ступеней РКН тандемной схемы подразделяется на следующие два основных этапа.

Этап 1. Определение стоимости РКН с системой спасения первой ступени.

На данном этапе определение стоимости РКН осуществляется с учетом нахождения априорных значений удельной стоимости системы спасения отработавшей первой ступени на основе получения ее приближенного аналитического выражения методами дифференциального исчисления функций.

Этап 2. Определение удельной стоимости обслуживания возвращаемой ступени РКН.

На данном этапе определение удельной стоимости обслуживания возвращаемой ступени РКН осуществляется в интересах определения целесообразности дальнейшего использования возвращаемых ступеней РКН тандемной схемы.

Последовательное выполнение приведенных выше этапов позволит обосновывать предельные сроки использования для РКН тандемной схемы.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТОИМОСТИ РКН С СИСТЕМОЙ СПАСЕНИЯ ПЕРВОЙ СТУПЕНИ

Решение задачи определения стоимости РКН основано на рассмотрении двухступенчатой РКН с компоновочной схемой «тандем», оснащенной системой спасения первой ступени. Система спасения включает в себя: аэродинамические решетки, дополнительные запасы топлива для торможения маршевым двигателем, парашютную систему, а также дополнительные конструктивные элементы.

В качестве допущений примем, что в общем виде система спасения определяется обобщенной массой всех конструктивных элементов и массой дополнительных запасов топлива.

Представим стоимость заданной РКН в следующем виде:

$$C_{\text{РКН}} = \bar{C}_I \cdot (m_{01} - m_{02}) + \bar{C}_{II} \cdot (m_{01} - m_{\text{ПН}}) + \bar{C}_{\text{ПН}} \cdot m_{\text{ПН}}, \quad (4)$$

где \bar{C}_I и \bar{C}_{II} – удельные стоимости первой и второй ступени, у. е./кг;

$\bar{C}_{\text{ПН}}$ – удельная стоимость полезной нагрузки, у. е./кг;

m_{01} и m_{02} – масса первой и второй ступени, кг;

$m_{\text{ПН}}$ – масса полезной нагрузки, кг.

Разделив левую и правую часть выражения (4) на m_{01} , получим

$$C_{\text{РКН}} = \bar{C}_I \cdot \left(1 - \frac{m_{02}}{m_{01}}\right) + \bar{C}_{II} \cdot \left(1 - \frac{m_{\text{ПН}}}{m_{01}}\right) + \bar{C}_{\text{ПН}} \cdot \frac{m_{\text{ПН}}}{m_{01}}.$$

Удельная стоимость i -й ступени, оборудованной системой спасения, будет определяться следующим выражением:

$$\bar{C}_i = \frac{C_i}{m_i} = \frac{\bar{C}_{ki} \cdot m_{ki} + \bar{C}_{де} \cdot m_{двi} + \bar{C}_{ти} \cdot m_{ти} + \bar{C}_{при} \cdot m_{при} + \bar{C}_{cci} \cdot m_{cci}}{m_{ki} + m_{двi} + m_{ти} + m_{при} + m_{cci}}, \quad (5)$$

где \bar{C}_{ki} , $\bar{C}_{двi}$, $\bar{C}_{ти}$, $\bar{C}_{при}$ и \bar{C}_{cci} – удельные стоимости всей конструкции, двигательной установки, ракетного топлива, системы управления и системы спасения i -й ступени соответственно, у. е./кг;

$m_{двi}$, $m_{ти}$, $m_{при}$ и m_{cci} – массы всей конструкции, двигательной установки, ракетного топлива, системы управления и системы спасения i -й ступени соответственно, кг.

В свою очередь, массовое уравнение двухступенчатой РКН можно представить в следующем виде:

$$\bar{m}_{\text{пн}} = \prod_{i=1}^2 \left[1 - (\bar{m}_{\text{нб}i} + \varphi_{0i} \gamma_{\text{дв}i}) - a_i \bar{m}_{\text{т}i} \right] \quad (6)$$

где $\bar{m}_{\text{нб}i}$ – масса конструкции небаковых отсеков i -й субракеты;
 $\bar{m}_{\text{т}i}$ – общий относительный запас топлива i -й субракеты с учетом гарантийного запаса и незабора топлива;
 φ_{0i} – начальная тяговооруженность i -й субракеты;
 $\gamma_{\text{дв}i}$ – удельный вес двигательной установки i -й субракеты;

Субракетой называется ракета космического назначения в целом или ее часть, предназначенная для движения на активном участке траектории, причем полезной нагрузкой для первой субракеты является вторая субракета, для второй – третья.

Значения коэффициента a_i в системе уравнений (6) рассчитываются с помощью выражения

$$a_i = (1 + \varepsilon_{\text{гар}i} + \varepsilon_{\text{ост}i}) \cdot \left(1 + \frac{K_{mi} \xi_{\text{ок}i} + \xi_{\text{г}i}}{K_{mi} + 1} \right), \quad (7)$$

где $\varepsilon_{\text{гар}i}$ – доля гарантийного запаса топлива i -й субракеты;
 $\varepsilon_{\text{ост}i}$ – доля незабора топлива i -й субракеты;
 K_{mi} – соотношение компонентов топлива i -й субракеты;
 $\xi_{\text{ок}i}$ – коэффициент конструкции бака окислителя i -й субракеты;
 $\xi_{\text{г}i}$ – коэффициент конструкции бака горючего i -й субракеты.

С учетом выражений (6) и (7) определим удельную стоимость i -й ступени, формула (5) преобразуется к виду

$$\bar{C}_i = \frac{\bar{C}_{\text{к}i} \cdot \bar{m}_{\text{к}i} + \bar{C}_{\text{дв}} \cdot \varphi_{0i} \cdot \gamma_{\text{дв}i} + b_i \cdot \bar{m}_{\text{т}i} + \bar{C}_{\text{пр}i} \cdot \bar{m}_{\text{пр}i} + \bar{C}_{\text{сс}i} \cdot \bar{m}_{\text{сс}i}}{\bar{m}_{\text{к}i} + \varphi_{0i} \cdot \gamma_{\text{дв}i} + a_i \cdot \bar{m}_{\text{т}i} + \bar{m}_{\text{пр}i} + \bar{m}_{\text{сс}i}}, \quad (8)$$

где b_i – коэффициент удельной стоимости топлива i -й ступени, который определяется по выражению

$$b_i = \bar{C}_{\text{т}i} + \bar{C}_{\text{к}i} \frac{m_{\text{к}i}}{m_{\text{т}i}}.$$

При этом для расчета значения $\bar{C}_{\text{т}i}$ используется выражение

$$\bar{C}_{\text{т}i} = \frac{\bar{C}_{\text{ок}i}}{K_{mi} + 1} \cdot \left(K_{mi} + \frac{\bar{C}_{\text{г}i}}{\bar{C}_{\text{ок}i}} \right).$$

Подставив значения удельных стоимостей ступеней из выражения (8) в уравнение (4) и выполнив ряд сокращений, получим окончательное выражение для удельной стоимости РКН

$$\begin{aligned} \bar{C}_{\text{РКН}} = & (\bar{C}_{\text{к}} \bar{m}_{\text{к}1} + \bar{C}_{\text{дв}} \gamma_{\text{дв}1} \varphi_{01} + b_1 \bar{m}_{\text{т}1} + \bar{C}_{\text{пр}1} \cdot \bar{m}_{\text{пр}1} + \bar{C}_{\text{сс}1} \cdot \bar{m}_{\text{сс}1}) + \\ & + (\bar{C}_{\text{к}} \bar{m}_{\text{к}2} + \bar{C}_{\text{дв}} \gamma_{\text{дв}2} \varphi_{02} + b_2 \bar{m}_{\text{т}2} + \bar{C}_{\text{пр}2} \cdot \bar{m}_{\text{пр}2}) \cdot \frac{m_{02}}{m_{01}} + \bar{C}_{\text{пн}} \cdot \bar{m}_{\text{пн}}. \end{aligned} \quad (9)$$

В настоящее время проблем с заданием значений для величин, входящих в выражение (9), практически нет. Исключение из выражения (9) составляет слагаемое $\bar{C}_{\text{сс}1} \bar{m}_{\text{сс}1}$, и для его определения не существует универсального подхода, а также нет накопленной годами статистической выборки.

И если трудности с отысканием значения $\bar{m}_{\text{сс}1}$, например, можно обойти путем задания оценочных значений массы системы спасения (с учетом необходимых дополнительных запасов топлива) в зависимости от способа возвращения отработавшей ступени, то нахождение значения $\bar{C}_{\text{сс}1}$ представляет собой труднореализуемую задачу, однозначное решение которой будет возможно только после проведенной серии летных испытаний.

В данной статье предложен один из способов нахождения априорных значений удельной стоимости системы спасения отработавшей первой ступени РКН, основанный на получении приближенного аналитического выражения для $\bar{C}_{ссл}$ методами дифференциального исчисления функций.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ СТОИМОСТИ ОБСЛУЖИВАНИЯ ВОЗВРАЩАЕМОЙ СТУПЕНИ

Проведенный в работе [7] анализ показал, что многократное применение блоков первых ступеней ракет-носителей может дать экономические выгоды. К тому же спасение первой ступени является наиболее простой из задач по многократному использованию элементов РКН в связи с относительно невысокими скоростями полета спасаемого объекта [8]. Поэтому определение стоимостных показателей послепускового обслуживания возвращаемой первой ступени осуществляется следующим образом.

Пусть затраты, связанные с послепусковым обслуживанием возвращаемой первой ступени (в том числе включающие в себя замену отдельных узлов и агрегатов на новые), равны $\{C_i\}, i \in N$.

С математической точки зрения $\{C_i\}$ есть отображение множества последовательности пусков $\{t_i\}$, которые являются набором дискретных величин, следовательно, $\{C_i\}$ – это *дискретная функция* аргумента $\{t_i\}$, при этом $C_{i+1} > C_i$. Кроме того, $\{C_i\}$ можно представить как сеточную функцию, значения которой определены в узлах равномерной сетки $\{t_i\}$.

1. Производная *непрерывного* аналога сеточной функции может быть определена через отношение конечных разностей [9]:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{C_{i+1} - C_i}{h} + O(h) = \frac{\Delta C_i}{h} + O(h), \quad (10)$$

где $O(h)$ – добавочный член, определяющий порядок точности вычисления $C(t)$ и зависящий от значения h и показателя степени при h .

Учитывая, что шаг рассматриваемой сеточной функции $h=1$, получим

$$\frac{dC}{dt} = \frac{C_{i+1} - C_i}{1} = \Delta C_i. \quad (11)$$

Затраты, связанные с послепусковым обслуживанием, возрастают прямо пропорционально количеству пусков, $\Delta C_i > 0$. Учитывая, что $\Delta C_i = \varphi_i C_i$, где φ_i – это некий коэффициент пропорциональности, будем иметь

$$\frac{dC}{dt} = \varphi C. \quad (12)$$

Уравнение (12) есть дифференциальное уравнение первого порядка с разделяющимися переменными, решая которое получим выражение для расчета затрат на послепусковое обслуживание возвращаемой ступени РКН

$$\ln C = \varphi t + \ln K \Rightarrow C = K \cdot \exp^{\varphi t}, \quad (13)$$

где значения коэффициентов K и φ находятся из решения задачи Коши для уравнения (9).

С учетом того, что необходимо получить решение в области значений *дискретной* функции $\{C_i\}$, для следствия в выражении (13) надо выполнить обратный переход к дискретным величинам:

$$C_i = K_i \cdot \exp^{\varphi_i t_i}, \quad i \in N. \quad (14)$$

Противоречивым обстоятельством является отличие размерности коэффициентов φ и φ_i для непрерывных и дискретных функций. Это связано с тем, что $[t] = c$, а для t_i размерность

является варьируемой величиной. Тогда для совпадения размерностей функций $\{C_i\}$ и $C(t)$ необходимо следующее допущение: $[\varphi]=1/c$.

Остается только найти значения K_i и φ_i для выражения (14). Для этого введем ряд условий:

- 1) коэффициент K_i зависит от начальной (прогнозной) стоимости послепускового обслуживания C_0 ;
- 2) при $i=1$, т. е. перед первым пуском, никаких дополнительных затрат не требуется: $C_1=0$;
- 3) при $i=2$, т. е. после первого пуска, финансовые затраты на послепусковое обслуживание равны начальным: $C_2=C_0$.

Условия (5) и (6) представляют собой дискретный аналог начальных условий для решения задачи Коши для непрерывной функции.

Таким образом, комбинируя между собой условия (10)–(12) и выражение (14), получаем окончательные выражения для определения K_i и φ_i :

$$\begin{cases} \varphi_i = \frac{i-2}{i}, \\ K_i = C_0(i-1). \end{cases} \quad (15)$$

И тогда, подставив значения для K_i и φ_i из формулы (15) в выражение (14), получаем конечное выражение для расчета финансовых затрат на послепусковое обслуживание возвращаемой первой ступени РКН:

$$C_i = (i-1) \cdot C_0 \cdot \exp^{i-2}, i \in N. \quad (16)$$

Легко проверить «работоспособность» выражения (16), используя приемы математической индукции и подставив в него значения $i = \{1; 2; N\}$:

$$\begin{cases} C_1 = (1-1) \cdot C_0 \cdot \exp^{1-2} = 0 \leftarrow \text{условие (a)}, \\ C_2 = (2-1) \cdot C_0 \cdot \exp^{2-2} = C_0 \leftarrow \text{условие (b)}, \\ C_N \rightarrow \infty. \end{cases} \quad (17)$$

Как видно из выражений (17), выполнение условий (a) и (b) соблюдается полностью, а в случае большого количества пусков возвращаемой ступени ее обслуживание становится нерентабельным и экономически выгоднее будет после определенного количества пусков заменять возвращаемую ступень на однотипную новую.

АПРОБАЦИЯ РАЗРАБОТАННОЙ МЕТОДИКИ

Апробация разработанной методики технико-экономического обоснования предельных сроков использования возвращаемых ступеней ракет космического назначения тандемной схемы проводилась на основе представленных ниже исходных данных.

Значения проектных параметров для жидкостных ракетных двигателей (ЖРД), работающих на определенных компонентах ракетного топлива (КРТ), можно взять из соответствующей справочной литературы, например из работы [10]. Для примера в табл. 1 приведены значения для ЖРД первой и второй ступеней РКН на КРТ (жидкий кислород и керосин) [11].

Таблица 1

Проектные параметры ЖРД для двухступенчатой РКН

№ ступени	K_{mi}	$\gamma_{дуi}$	φ_{0i}	$\varepsilon_{гарi}$	$\varepsilon_{остi}$	$\xi_{окi}$	$\xi_{гi}$	$\overline{m_{сc1}}$
1	2,6	0,012	1,4	0,005	0,0013	0,035	0,04	0,05
2	2,6	0,015	1,05	0,01	0,0014	0,035	0,05	–

Результаты расчета с использованием разработанной методики с учетом исходных данных, приведенных в табл. 1 и 2, представлены на рис. 1. Характер изменения удельной стоимости 1 кг полезной нагрузки (ПН) при выводе на целевую орбиту в зависимости от количества пусков, представленный на рис. 1, позволяет обосновывать предельные сроки использования возвращаемых первых ступеней РКН тандемной схемы, при этом сравнивая их с РКН без системы спасения (СС).

Таблица 2

Исходные данные по значениям удельных стоимостей элементов i -й ступени (у. е./кг)

№ ступени	$\bar{C}_{окi}$	$\bar{C}_{ги}$	$\bar{C}_{ки}$	$\bar{C}_{двi}$	$\bar{C}_{пнi}$	$\bar{C}_{при}$	$\bar{C}_{ссл}$	$m_{пн}, Т$
1	0,09	0,16	60	80	1200	750	200	3
2	0,09	0,16	60	80	1000	750		

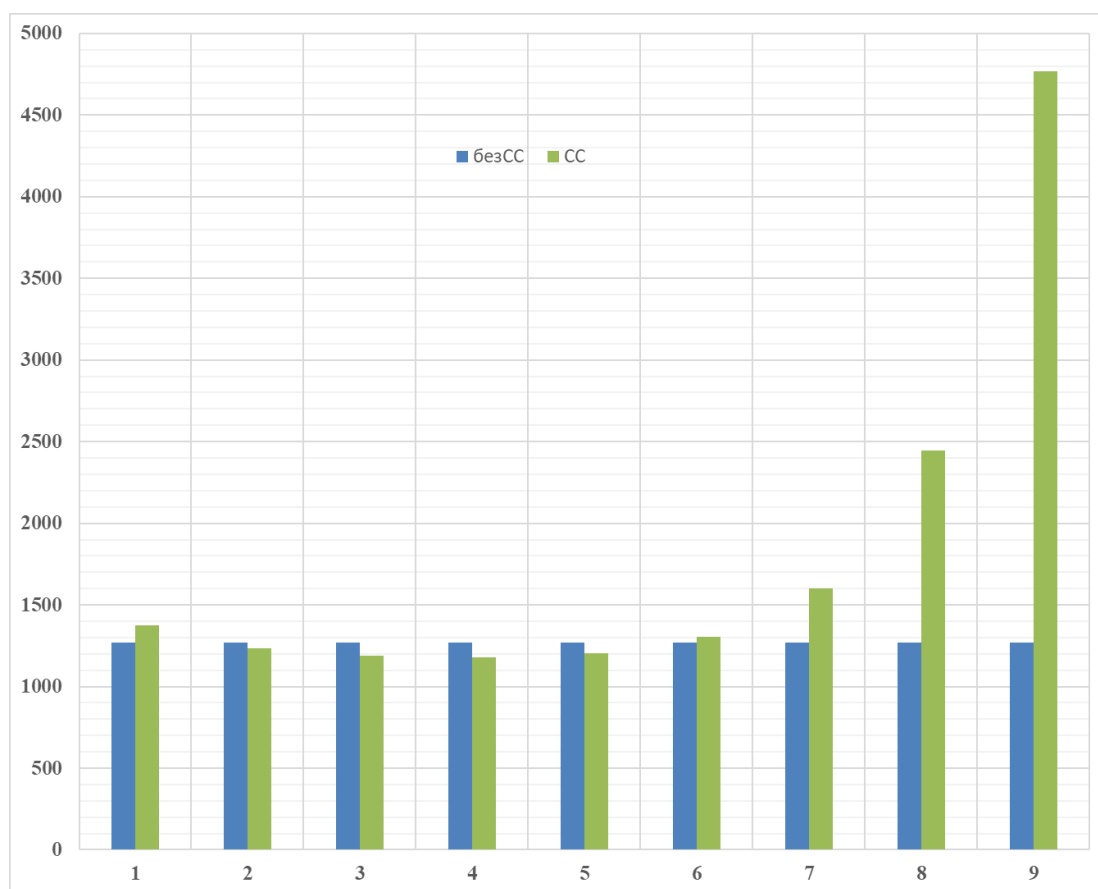


Рис. 1. Зависимость удельной стоимости 1 кг ПН при выводе на целевую орбиту от количества пусков:
a – для РКН без СС; *б* – для РКН с СС

На рис. 2 представлена столбчатая диаграмма относительного изменения стоимости запуска одного килограмма ПН РКН со спасаемой первой ступенью в зависимости от количества запусков по сравнению с РКН с такой же стартовой массой, но без системы спасения ракетного блока. Кроме того, на рис. 2 показано изменение относительной стоимости запуска РКН при различных значениях удельной стоимости СС ($\bar{C}_{ссл}$) и послепускового обслуживания возвратившейся ступени ($\bar{C}_{ссл}^{обсл}$), выраженных в процентах от стоимости всей РКН без системы спасения.

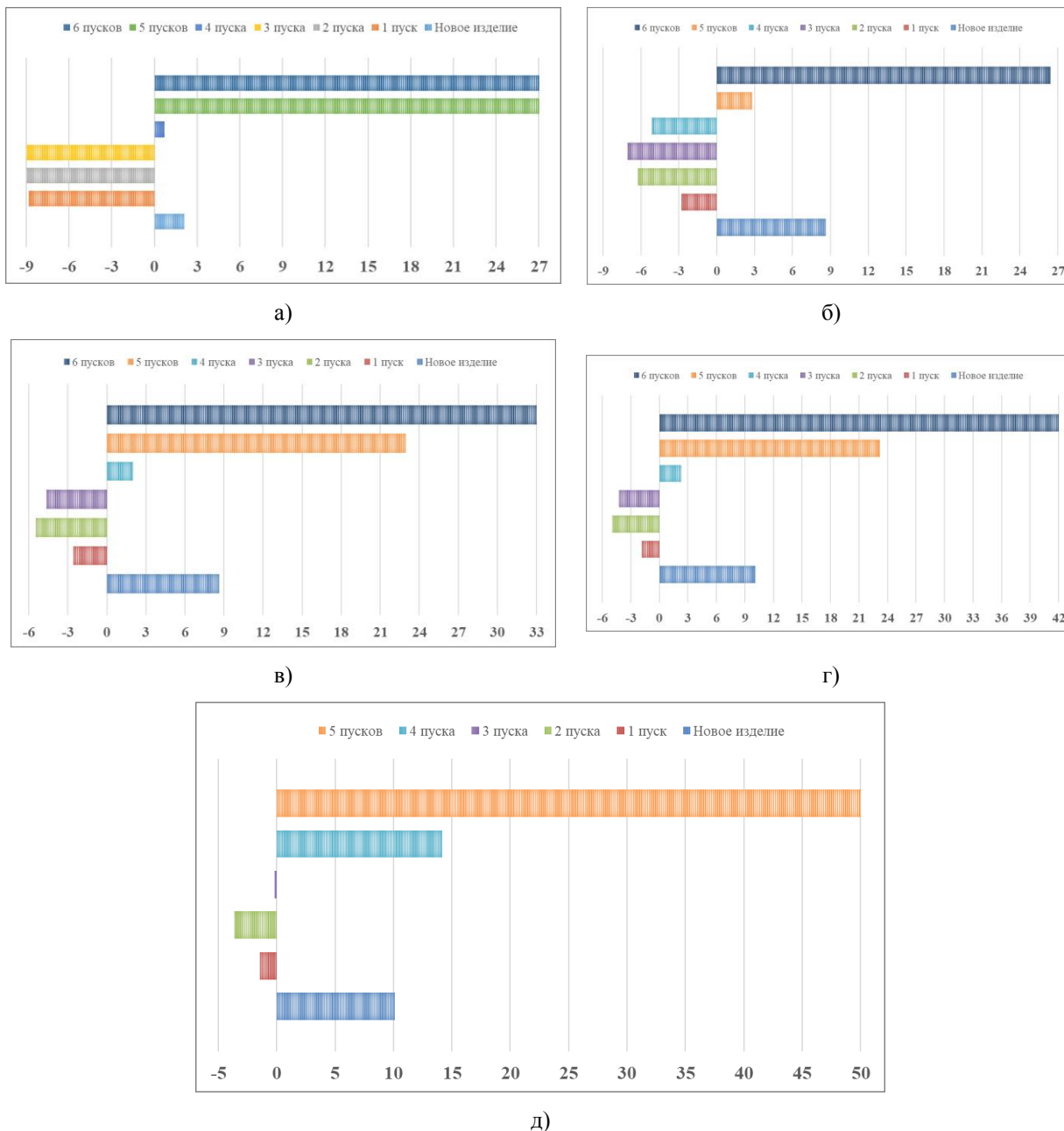


Рис. 2. Относительная разница стоимости запуска 1 кг ПН между обычной РКН и оборудованной системой спасения первой ступени в зависимости от количества пусков:

$$\begin{aligned}
 a - \bar{C}_{\text{ОСС}} = 5\% \text{ и } \bar{C}_{\text{СС}}^{\text{обсл}} = 2\% ; \quad b - \bar{C}_{\text{ОСС}} = 10\% \text{ и } \bar{C}_{\text{СС}}^{\text{обсл}} = 2\% ; \\
 v - \bar{C}_{\text{ОСС}} = 10\% \text{ и } \bar{C}_{\text{СС}}^{\text{обсл}} = 5\% ; \quad z - \bar{C}_{\text{ОСС}} = 20\% \text{ и } \bar{C}_{\text{СС}}^{\text{обсл}} = 5\% ; \\
 d - \bar{C}_{\text{ОСС}} = 20\% \text{ и } \bar{C}_{\text{СС}}^{\text{обсл}} = 10\%
 \end{aligned}$$

Анализ диаграмм на рис. 2 показывает следующее:

– существуют области рационального использования РКН с СС первой ступени, которые показывают, что начиная со второго пуска РКН стоимость запуска 1 кг полезной нагрузки может быть меньше по сравнению с РКН без СС, но при этом имеются ограничения в виде количества запусков, когда становится экономически невыгодно использовать отработанную

первую ступень. Поэтому либо стоит использовать для запуска ПН обычную РКН, либо следует заменить возвращаемую ступень на новую;

– увеличение значений \bar{C}_{0CC} и $\bar{C}_{CC}^{\text{обсл}}$ приводит к сужению области рационального использования возвращаемой первой ступени РКН по критерию минимальной стоимости, по сравнению с обычной РКН;

– для двух различных вариантов (показанных, например, на рис. 2,а и б) при одинаковых значениях \bar{C}_{0CC} , но различных $\bar{C}_{CC}^{\text{обсл}}$ экономическая выгода наступает раньше там, где значение $\bar{C}_{CC}^{\text{обсл}}$ меньше; при этом интегральная стоимость запуска 1 кг ПН в пределах области рационального использования РКН с СС также снижается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты апробации разработанной методики позволили обосновать предельные сроки эксплуатации возвращаемых ступеней РКН для заданных исходных данных. Методика технико-экономического обоснования предельных сроков использования возвращаемых ступеней РКН тандемной схемы может быть использована для обоснования стоимостных показателей создания и эксплуатации таких космических средств выведения в рамках технико-экономического обоснования мероприятий долгосрочных плановых документов развития ракетно-космической техники Российской Федерации.

Одним из дальнейших направлений совершенствования технико-экономического обоснования предельных сроков использования возвращаемых РКН тандемной схемы будут являться определение и учет различных ставок дисконтирования, в соответствии с которыми планируются финансовые затраты на весь период развертывания требуемой орбитальной группировки космических аппаратов РКН с многократными и однократными ступенями.

Кроме того, разработанная методика позволяет обосновывать предельные сроки использования для РКН тандемной схемы, но она может быть доработана и для пакетной схемы компоновки ступеней РКН.

Список используемых источников

1. Ганиев Т. А., Карякин В. В., Ганиев Т. А. Космическая политика мировых и региональных держав. – М. : Архонт, 2020. – 175 с.
2. Эффективность использования и проблемы спасения первых ступеней ракет-носителей / А. С. Коротеев [и др.] // Полет : общерос. научно-техн. журн. – 2018. – № 2. – С. 3–11.
3. Медведев А. А. Предложения по повышению конкурентоспособности ракет-носителей среднего и тяжелого классов за счет применения многократных элементов в отечественных средствах выведения // Космонавтика и ракетостроение. – 2018. – № 3(102). – С. 111–121.
4. Компания «Space X» и программа коммерческих пилотируемых полетов США / В. П. Краснослободцев [и др.] // Двойные технологии. – 2020. – № 3(92). – С. 16–19.
5. Новости космонавтики. – URL: <https://novosti-kosmonavtiki.ru/news/35945/> (дата обращения: 5.10.2022).
6. Оценка влияния класса ракеты-носителя на снижение удельной стоимости выведения полезного груза за счет многократного использования жидкостного ракетного двигателя первой ступени / Д. Г. Белянин [и др.] // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2020. – Вып. 675. – С. 213–216.
7. Советкин Ю. А., Щербина Д. В. Оценка технико-экономической эффективности разработки ракет-носителей с многократными блоками первых ступеней // Вестник Самарского

государственного аэрокосмического университета имени академика С. П. Королёва (национального исследовательского университета). – 2010. – № 1(21). – С. 91–96.

8. *Кузнецов Ю. Л., Украинцев Д. С.* Анализ влияния схемы полета ступени с ракетно-динамической системой спасения на энергетические характеристики двухступенчатой ракеты-носителя среднего класса // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С. П. Королёва (национального исследовательского университета). – 2016. – Т. 15, № 1. – С. 73–80. – DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-1-73-80.

9. Космические траекторные измерения. Радиотехнические методы измерений и математическая обработка данных / под ред. П. А. Агаджанова, В. Е. Дулевича, А. А. Коростелева. – М. : Сов. радио, 1969. – 411 с.

10. Моделирование функционирования ракетно-космических комплексов : учеб. пособие для слушателей и курсантов высших военно-учебных заведений / А. Ю. Карчин [и др.]. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2019. – 244 с.

11. *Пирогов С. Ю., Прокопенко Е. А.* Методика энергомассового анализа двухступенчатой ракеты-носителя, оборудованной системой спасения ступеней // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 665. – С. 231–236.

В. М. Локтионов;
И. С. Щербина,
кандидат технических наук, доцент

ОЦЕНИВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ НА ОСНОВЕ ЛОГИКО-ВЕРОЯТНОСТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В статье описан подход к классификации состояний организационно-технической системы военного назначения с использованием экспериментальных данных, получаемых в процессе ее функционирования. Такой подход позволяет обеспечить лицо, принимающее решение, необходимой информацией для принятия управленческого решения. Особенностью данного подхода являются совместное использование в процессе классификации разнородных данных об организационно-технической системе, полученных измерительными и экспертными методами, и реализация дискриминантных правил с помощью функций алгебры логики и построения минимальных путей и сечений.

Ключевые слова: организационно-техническая система, экспериментальные данные, оценивание, принятие решения, логико-вероятностная модель

ВВЕДЕНИЕ

Увеличение объема информации, поступающей в органы управления организационно-технической системой военного назначения (ОТС ВН) и непосредственно к руководителям, усложнение решаемых задач, необходимость учета большого числа взаимосвязанных факторов и быстро меняющаяся обстановка – все это требует разработки алгоритмов поддержки принятия решений, позволяющих автоматизировать процесс управления. Трудность понимания причинно-следственных зависимостей в сложной ОТС, особенно в условиях временных ограничений, неполноты или избыточности информации, приводит к неэффективному управлению, а такое управление, в свою очередь, – к увеличению вероятности принятия ошибочных решений и значительным затратам на парирование последствий неверных управленческих решений. В указанных условиях моделирование становится единственным практически эффективным средством нахождения путей оптимального (либо приемлемого) решения проблем в сложных системах, средством поддержки принятия ответственных решений [1].

В любой схеме управления состоянием ОТС ВН одним из основных этапов являются сбор данных, оценивание и прогнозирование ее состояния. Состояние ОТС ВН включает в себя: состояние технических средств и людей, работающих в системе (должностные лица управления и обслуживающий персонал); профессиональную работоспособность включенных в систему операторов, отражающую их пригодность и подготовленность для работы на конкретном рабочем месте; безошибочное выполнение операторами требуемых действий. В соответствии с общим алгоритмом управления ОТС необходимо классифицировать состояния организационно-технических систем управления и совокупность параметров для их идентификации.

Оценивание состояния ОТС ВН с помощью подхода, основанного на построении структурных моделей, удовлетворяет ряду требований, к которым относятся:

– дифференцированное применение различных критериев;

- комплексное использование всех видов исходной информации (статистической, измерительной, экспертной);
- построение интегрированных моделей с возможностью формирования условий дальнейшей эксплуатации;
- возможность получения количественных значений показателей надежности для любой составной части системы и для системы в целом;
- возможность ранжирования составных частей системы по степени вклада.

В основе построения данных моделей лежит модель в форме выборки таких экспериментальных данных, как инструментально измеряемые параметры оборудования и процессов, параметры, характеризующие условия эксплуатации [2].

Такой набор данных можно представить в виде таблицы (табл. 1) типа «объект – признак». Под «объектом» понимается строка таблицы ($\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_r$), а под «признаком» – столбец ($x_1, \dots, x_i, \dots, x_n$). Признаки могут соответствовать:

- внутренним параметрам системы,
- входным параметрам,
- параметрам внешней среды;
- условиям эксплуатации, воздействующим на объект,
- управляющим или случайным помехам,
- результатам экспертной интерпретации состояний элементов ОТС ВН [2].

Таблица позволяет наиболее простым и естественным путем объединить в рамках единой структуры самую разнообразную информацию о ОТС ВН, множество совершенно различных моделей с тем, чтобы эту информацию можно было бы использовать совместно.

Эффективное использование такой модели объекта для решения задач оценивания ТС, а также вероятностей их безотказной работы в значительной мере зависит от того, насколько эффективными окажутся применяемые методы построения моделей состояний системы по экспериментальным данным.

Таблица 1

Представление модели ТС ТОб в форме набора экспериментальных данных

№ обл.	Номер признака																Класс состояний			
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}	q_1	q_2	q_3	q_4
ω_1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			
ω_2	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1		1		
ω_3	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1		
ω_4	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1			1	
ω_5	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1				1
ω_6	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1				1

На практике модель объекта в виде таблицы будет практически всегда содержать данные, представленные в различных типах шкал. Компоненты отдельной строки могут быть выражены в номинальной, числовой, логической шкалах и т. д. Это означает прежде всего, что не со всеми данными таблицы можно производить одни и те же преобразования.

Одной из проблем совместной обработки данных, для обнаружения закономерностей, является разнообразие типов данных. Также не существует единого метода обнаружения закономерностей, который позволил бы справиться с обработкой разнотипных данных. Поэтому необходимо разработать комплекс методов и алгоритмов, которые могут позволить эффективно построить модель для решения задачи оценивания состояния ОТС и применить ее в рамках единой модели для принятия решений. Практически во всех случаях общая идея обучения в условиях разнотипности шкал представления данных состоит в сведении описания данных к единой шкале, при этом в качестве последней обычно выбирается бинарная шкала.

Мотивация разумности такого подхода достаточно очевидна: в таком описании данные представляются в агрегированном виде, и осуществляется переход к более простой шкале их описания.

Таблица 2

Диагностические признаки

№ п/п	Обозначение	Диагностические признаки
1	x_1	Прием ТМИ на двух рабочих частотах с разнесением по поляризации
2	x_2	Прием ТМИ на четырех рабочих частотах
3	x_3	Чувствительность ППУ1, ППУ2 канала 1-й станции при приеме радиосигнала, мкВ (минимальный уровень сигнала – не более 10)
4	x_4	Чувствительность ППУ1, ППУ2 канала 2-й станции при приеме радиосигнала, мкВ (минимальный уровень сигнала – не более 10)
5	x_5	Полоса захвата АПЧ ППУ1, ППУ2 канала 1-й станции при приеме радиосигнала, кГц (не более ± 100)
6	x_6	Полоса захвата АПЧ ППУ1, ППУ2 канала 2-й станции при приеме радиосигнала, кГц (не более ± 100)
7	x_7	Значение уровня контрольного радиосигнала, В (при установке выходного напряжения 20 ± 2 мВ может иметь отклонение $\pm 0,05$ В)
8	x_8	Сопряжение с аппаратурой ССПД и передача полного или сокращенного потока ТМИ
9	x_9	Прием видеосигналов ТМИ
10	x_{10}	Сопротивление электрической изоляции, МОм (не менее 20)
11	x_{11}	Назначенный срок службы, лет
12	x_{12}	Назначенный ресурс, ч
13	x_{13}	Время непрерывной работы, ч
14	x_{14}	Температурно-влажностный режим
15	x_{15}	Обеспеченность ЗИП
16	x_{16}	Квалификация личного состава

Также экспериментальные данные можно характеризовать такими свойствами, как размерность и объем. Под размерностью понимается размерность вектора признаков $\vec{X} = \langle x_1, \dots, x_i, \dots, x_n \rangle^T$. Он может иметь порядок, который составляет несколько десятков и более. При этом возникает проблема, известная как задача поиска информативных признаков. Под объемом обучающих данных понимается число строк в таблице «объект – признак», которые являются реализациями одного и того же класса состояния ОТС и на множестве которых решается задача обнаружения закономерностей. Обычно их не больше десяти строк. Это ограничивает возможности использования статистических методов и повышает роль аналитических моделей, которые позволили бы пополнять массивы данных. Имея достаточный объем таких данных, с помощью математических методов обнаружения закономерностей можно разработать весьма эффективные модели оценивания технического состояния или вероятности безотказной работы.

Описание свойств конкретного состояния ОТС ВН должно позволять надежно отличать одно состояние от другого. Это в дальнейшем при принятии решения о состоянии системы позволит выработать определенный порядок действий, необходимый для обеспечения требуемого состояния в процессе управления.

При управлении ОТС ВН множество возможных ее состояний может включать в себя достаточно много классов. Это приводит к большим сложностям при построении схемы принятия решений по отнесению к классу состояний на основе результатов оценивания диагностических признаков. Необходимо построить достаточно объемную по количеству правил базу

знаний с целью отличия одного класса состояний от множества других. Для решения этой проблемы используют подход на основе дерева решений или метасхемы принятия решений.

Рассмотрим множество классов состояний системы:

– система исправна и работоспособна (q_1);

– система неисправна, но работоспособна (q_2);

– система неработоспособна, но ее работоспособность может быть восстановлена силами БР (q_3);

– система неработоспособна, но ее работоспособность может быть восстановлена при выполнении РВР представителями промышленности (q_4).

Будем полагать, что q_i принимает значение «истина», когда состояние работоспособности отвечает соответствующему классу, и значение «ложь», когда это не так. Заметим, что в каждом конкретном случае истинной может быть только одна переменная из этого списка.

Введем следующие метаклассы состояний, определенных логической формулой:

$$mq_0 = q_1 \vee q_2 \vee q_3 \vee q_4, mq_1 = q_1 \vee q_2, mq_2 = q_3 \vee q_4;$$

$$mq_0 = mq_1 \vee mq_2.$$

Отношение порядка на множестве введенных метаклассов и исходных классов состояний представлено на рис. 1. Это отношение порядка задает также и допустимые последовательности шагов по принятию решений. Например, на первом шаге, когда нет никакой информации о состоянии системы, необходимо принимать решение о том, какому из двух метасостояний – mq_1 или mq_2 – относится анализируемое состояние работоспособности.

Различение двух классов – задача значительно более простая, чем, например, различение четырех классов. Предположим, что построена база знаний, которая позволяет различать два метасостояния – mq_1 и mq_2 . Практика показывает, что такая база знаний всегда будет содержать намного меньше правил, чем база знаний для различения, скажем, четырех классов состояний (причем не в четыре раза, а гораздо больше). В такой базе знаний вывод будет выполняться быстрее, и при этом тоже не в семь раз, а, как правило, гораздо быстрее.

Аналогичное отношение будет характерно и для каждого из последующих шагов вывода в соответствии с метасхемой (деревом решений), представленной на рис. 1.

Использование метасхемы приводит к созданию существенно более эффективных алгоритмов поиска решений, чем в случае, когда метасхема вывода не используется.

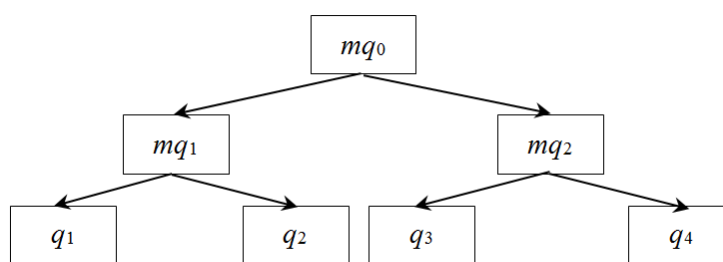


Рис. 1. Схема отношений метаклассов и исходных классов состояний

Пусть обучающие данные, полученные в ходе эксплуатации, представлены в виде таблице «объект – признак» (см. табл. 1). Каждое состояние описывается набором из 16 признаков, представленных в логической шкале. Значению «истина» соответствует символ «1», а значению «ложь» – символ «0». Каждой строке поставлено в соответствие значение истинности утверждения о принадлежности к тому или иному классу состояний.

Каждому метапонятию ставится в соответствие пара альтернатив (решений) о дальнейшем уточнении класса ТС. Для этого необходимо:

1) построить дискриминантные описания альтернатив, отвечающие возможным решениям в соответствующем узле метасхемы;

2) построить правила принятия решений о выборе той или иной альтернативы в зависимости от имеющейся информации о параметрах ОТС ВН [2].

При построении дискриминантных описаний прежде всего производится выбор признаков, которые будут использоваться при этом. Для этого сформируем общий список всех признаков (см. табл. 2). Выберем из них подмножество, которое будет доступно для контроля. Так, минимальным набором признаков для описания состояний mq_1 и mq_2 будут $(x_1, x_3, x_4, x_5, x_6, x_9)$.

Следующим шагом будет построение самих описаний. С помощью этих описаний устанавливаются закономерности в виде правил, аргументов, отношений или в другой форме. Структурная схема описания узлов mq_1 и mq_2 представлена на рис. 2.

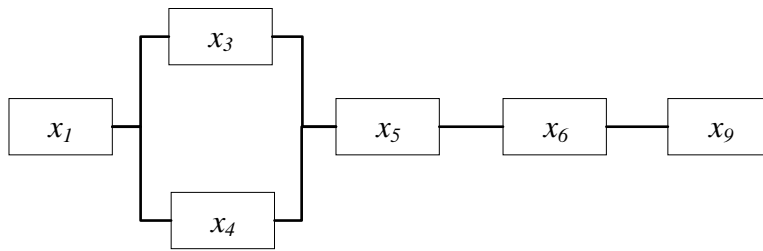


Рис. 2. Структурная схема для описания узлов mq_1 и mq_2

Исходя из схемы, построим решающее правило для определения класса технического состояния mq_1 – система работоспособна: «если признаки $(x_1 \wedge x_5 \wedge x_6 \wedge x_9 \wedge (x_3 \vee x_4))$ принимают значение «1», то система работоспособна (mq_1)». Для состояния mq_2 – система неработоспособна, правило будет иметь следующий вид: «если признаки $(x_1 \vee x_5 \vee x_6 \vee x_9 \vee (x_3 \wedge x_4))$ принимают значение «0», то система неработоспособна (mq_2)».

Построим дискриминантные описания для остальных состояний ОТС. Минимальным набором признаков для описания состояния q_1 будут $(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10})$. Несответствие хотя бы одного признака приводит ТС ТОБ в другой вид состояния. Структурная схема описания узлов mq_1 и mq_2 представлена на рис. 3.



Рис. 3. Структурная схема для описания состояния q_1

Решающее правило для состояния q_1 запишем следующим образом: «Если признаки $(x_1 - x_{10})$ принимают значение «1», то система исправна и работоспособна (q_1)».

Для состояний q_2 , q_3 и q_4 минимальными наборами признаков являются подмножества $(x_1, x_3, x_4, x_5, x_6, x_9)$, $(x_1, x_5, x_6, x_9, x_{15}, x_{16})$ и (x_1, x_5, x_6, x_9) соответственно. Структурные схемы для описания состояний q_2 , q_3 и q_4 представлены на рис. 4–6.

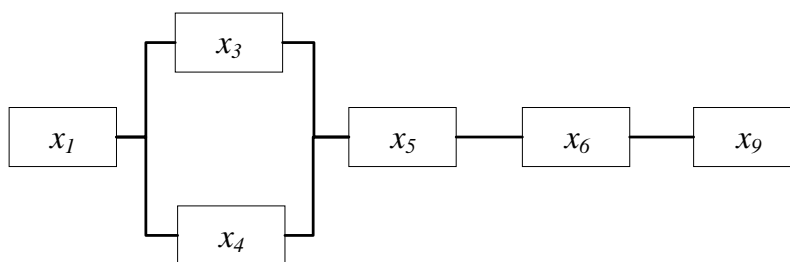


Рис. 4. Структурная схема для описания состояния q_2

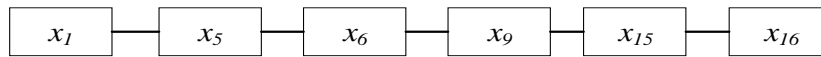


Рис. 5. Структурная схема для описания состояния q_3

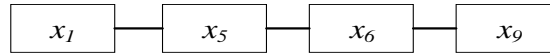


Рис. 6. Структурная схема для описания состояния q_4

Построим решающие правила для состояний q_2 , q_3 и q_4 . Для состояния q_2 решающее правило имеет следующий вид: «если признаки $(x_1 \wedge (x_3 \vee x_4) \wedge x_5 \wedge x_6 \wedge x_9)$ принимают значение «1», то система неисправна, но работоспособна (q_2)». Необходимо заметить, что решающие правила для состояния q_2 и узла mq_1 совпадают.

Для состояния q_3 : «если признаки $(x_1 \wedge x_5 \wedge x_6 \wedge x_9 \wedge x_{15} \wedge x_{16})$ принимают значение «1», то система неработоспособна, но ее работоспособность может быть восстановлена силами боевого расчета (q_3)». Для состояния q_4 : «если признаки $(x_1 \vee x_5 \vee x_6 \vee x_9)$ принимают значение «0», то система неработоспособна, но ее работоспособность может быть восстановлена при выполнении РВР представителями промышленности (q_4)»

Достижение системой одного из состояний можно записать с помощью минимальных путей (МП) и минимальных сечений (МС).

Минимальный путь системы – это конъюнкция ее элементов и условий, когда ни одну из компонент нельзя изъять, не нарушив состояния системы

$$R_l = \bigwedge_{i \in K_{R_l}} x_i, \tag{1}$$

где K_{R_l} – означает множество номеров соответствующих пути R_l .

Минимальным сечением системы называется такая конъюнкция отрицаний ее элементов и условий, когда ни одну из компонент нельзя изъять, не нарушив состояния системы

$$S_j = \bigwedge_{i \in K_{S_j}} \bar{x}_i. \tag{2}$$

Любая система с конечным числом элементов и наложенных условий имеет конечное число минимальных путей ($l=1,2,\dots,d$) и минимальных сечений ($j=1,2,\dots,m$). Тогда условие недостижения состояния системы может быть записано двумя различными способами:

а) через минимальные пути

$$\overline{y(x_1, \dots, x_n)} = \bigwedge_{l=1}^d \bar{R}_l = \bigwedge_{l=1}^d \left[\bigvee_{i \in K_{R_l}} \bar{x}_i \right] = 1, \tag{3}$$

в виде конъюнкции отрицаний всех имеющихся минимальных путей;

б) через минимальные сечения

$$\overline{y(x_1, \dots, x_n)} = \bigvee_{j=1}^m S_j = \bigvee_{j=1}^m \left[\bigwedge_{i \in K_{S_j}} \bar{x}_i \right] = 1, \tag{4}$$

в виде дизъюнкции всех имеющихся минимальных сечений.

В свою очередь, условия достижения состояния имеют вид:

а) через минимальные пути

$$y(x_1, \dots, x_n) = \bigvee_{l=1}^d R_l = \bigvee_{l=1}^d \left[\bigwedge_{i \in K_{R_l}} x_i \right] = 1, \tag{5}$$

в виде дизъюнкции всех имеющихся минимальных путей;

б) через минимальные сечения

$$y(x_1, \dots, x_n) = \bigwedge_{l=1}^m S_l = \bigwedge_{l=1}^m \left[\bigvee_{i \in K_{S_l}} x_i \right] = 1, \quad (6)$$

в виде конъюнкции отрицаний всех имеющихся минимальных сечений [3].

Как было указано выше, когда нет никакой информации о состоянии ОТС ВН, необходимо принимать решение о том, какому из двух метасостояний – mq_1 или mq_2 – относится анализируемое состояние работоспособности.

Исходя из анализа рис. 2, запишем множество минимальных путей для достижения состояния mq_1 :

$$R_{mq_1} = \{R_1 = (x_1, x_3, x_5, x_6, x_9); R_2 = (x_1, x_4, x_5, x_6, x_9)\}.$$

Множество минимальных сечений для достижения состояния mq_1

$$S_{mq_1} = \{S_1 = x_1, S_2 = \{x_3, x_4\}, S_3 = x_5, S_4 = x_6, S_5 = x_9\}.$$

Логическая функция достижения состояния mq_1 может быть записана как

$$y(x_1, \dots, x_{16}) = x_1 x_3 x_5 x_6 x_9 \vee x_1 x_4 x_5 x_6 x_9 = 1$$

или

$$y(x_1, \dots, x_{16}) = x_1 (x_3 \vee x_4) x_5 x_6 x_9 = 1$$

либо как

$$\overline{y(x_1, \dots, x_{16})} = (\bar{x}_1 \vee \bar{x}_3 \vee \bar{x}_5 \vee \bar{x}_6 \vee \bar{x}_9)(\bar{x}_1 \vee \bar{x}_4 \vee \bar{x}_5 \vee \bar{x}_6 \vee \bar{x}_9) = 0$$

или

$$\overline{y(x_1, \dots, x_{16})} = \bar{x}_1 \vee \bar{x}_3 \bar{x}_4 \vee \bar{x}_5 \vee \bar{x}_6 \vee \bar{x}_9 = 0.$$

Условие недостижения состояния mq_1 может быть записано (достижения состояния mq_2)

как

$$\overline{y(x_1, \dots, x_{16})} = (\bar{x}_1 \vee \bar{x}_3 \vee \bar{x}_5 \vee \bar{x}_6 \vee \bar{x}_9)(\bar{x}_1 \vee \bar{x}_4 \vee \bar{x}_5 \vee \bar{x}_6 \vee \bar{x}_9) = 1$$

или

$$\overline{y(x_1, \dots, x_{16})} = \bar{x}_1 \vee \bar{x}_3 \bar{x}_4 \vee \bar{x}_5 \vee \bar{x}_6 \vee \bar{x}_9 = 1$$

либо как

$$y(x_1, \dots, x_{16}) = x_1 x_3 x_5 x_6 x_9 \vee x_1 x_4 x_5 x_6 x_9 = 0$$

или

$$y(x_1, \dots, x_{16}) = x_1 (x_3 \vee x_4) x_5 x_6 x_9 = 0.$$

Для анализа может быть выбрана наиболее компактная логическая форма, хотя все формы эквиваленты конечному результату.

Такое описание позволяет наиболее полно представить причинно-следственные связи между состояниями системы и состоянием ее элементов.

Аналогично рассмотрим условия достижения других состояний согласно рис. 3–6 для состояний: q_1 , q_2 , q_3 и q_4 .

Множество минимальных путей и сечений для достижения состояния q_1 –

$$R_{q_1} = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}), \\ S_{q_1} = \{S_1 = x_1, S_2 = x_2, S_3 = x_3, S_4 = x_4, S_5 = x_5, S_6 = x_6, S_7 = x_7, S_8 = \\ = x_8, S_9 = x_9, S_{10} = x_{10}\}.$$

Условие недостижения состояния q_1 может быть записано как

$$x_1 x_2 x_3 x_4 x_5 x_6 x_7 x_8 x_9 x_{10} = 0$$

либо

$$\bar{x}_1 \vee \bar{x}_2 \vee \bar{x}_3 \vee \bar{x}_4 \vee \bar{x}_5 \vee \bar{x}_6 \vee \bar{x}_7 \vee \bar{x}_8 \vee \bar{x}_9 \vee \bar{x}_{10} = 1.$$

Множество минимальных путей и сечений для достижения состояния q_2 будет выглядеть так же, как и для достижения состояния mq_1 .

Множество минимальных путей и сечений для достижения состояния q_3 –

$$R_{q_3} = (x_1, x_5, x_6, x_9, x_{15}, x_{16}), \\ S_{q_3} = \{S_1 = x_1, S_5 = x_5, S_6 = x_6, S_9 = x_9, S_{15} = x_{15}, S_{16} = x_{16}\}.$$

Логическая функция достижения состояния q_3 может быть записана как

$$x_1 x_5 x_6 x_9 x_{15} x_{16} = 1$$

либо

$$\bar{x}_1 \vee \bar{x}_5 \vee \bar{x}_6 \vee \bar{x}_9 \vee \bar{x}_{15} \vee \bar{x}_{16} = 0.$$

Условие недостижения состояния q_3 может быть записано следующим образом:

$$x_1 x_5 x_6 x_9 x_{15} x_{16} = 0$$

либо

$$\bar{x}_1 \vee \bar{x}_5 \vee \bar{x}_6 \vee \bar{x}_9 \vee \bar{x}_{15} \vee \bar{x}_{16} = 1.$$

Множество минимальных путей и сечений для достижения состояния q_4 –

$$R_{q_4} = (x_1, x_5, x_6, x_9), \\ S_4 = \{S_1 = x_1, S_5 = x_5, S_6 = x_6, S_9 = x_9\}.$$

Логическая функция достижения состояния q_4 может быть записана как

$$x_1 x_5 x_6 x_9 = 0$$

либо

$$\bar{x}_1 \vee \bar{x}_5 \vee \bar{x}_6 \vee \bar{x}_9 = 1.$$

Условие недостижения состояния q_4 может быть записано следующим образом:

$$x_1 x_5 x_6 x_9 = 1$$

либо

$$\bar{x}_1 \vee \bar{x}_5 \vee \bar{x}_6 \vee \bar{x}_9 = 0.$$

Для оценивания вероятности достижения состояния системы по логическим функциям достижения состояний необходимо найти аналитические выражения для вероятностной функции и постановки в нее значений вероятностей того, что диагностический признак примет то или иное значение в определенных условиях на определенном интервале $[0, t]$. Существуют такие формы задания функции алгебры логики, которые допускают переход в вероятностную функцию $P[f(X)]$ путем замены логических переменных x_i вероятностями p_i и логических операций, называемых формами перехода к замещению [2].

Рассмотрим логическую функцию достижения состояния mq_1 , образованную на основе минимальных сечений $y = x_1(x_3 \vee x_4)x_5x_6x_9$. В этой функции алгебры логики отсутствуют повторяющиеся элементы, поэтому она может быть преобразована по правилу де Моргана к формам перехода к замещению:

$$y = x_1 \bar{x}_3 \bar{x}_4 x_5 x_6 x_9.$$

Получим по правилу замещения выражение для вероятностной функции достижения состояния mq_1

$$P = p_1 [1 - (1 - p_3)(1 - p_4)] p_5 p_6 p_9.$$

После преобразования получим $P = p_1 p_5 p_6 p_9 (p_3 + p_4 - p_3 p_4)$.

Если через $P(t)$ обозначить вероятность достижения состояния системы на интервале времени $[0, t]$, то

$$P(t) = p_1(t) p_5(t) p_6(t) p_9(t) (p_3(t) + p_4(t) - p_3(t) p_4(t)).$$

Логико-вероятностные модели исследования структурно-сложных систем позволяют:

- судить о роли отдельных элементов в обеспечении надежности системы;
- рационально воздействовать на повышение надежности системы путем резервирования отдельных элементов;
- определять приоритеты в системе с целью ее восстановления, а также для управления ею.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подход к оцениванию состояния ОТС ВН на базе логико-вероятностной модели основан на дифференцированном оценивании влияния каждого элемента на его состояние. При этом

используются различные атрибуты и виды исходной информации об изменении характеристик элементов комплекса.

Список используемых источников

1. *Аксенов К. А., Гончарова Н. В.* Моделирование и принятие решений в организационно-технических системах : учеб. пособие : в 2 ч. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2015. – Ч. 1. – 104 с.
2. *Прохорович В. Е.* Прогнозирование состояния сложных технических комплексов. – СПб. : Наука, 1999. – 158 с.
3. *Мионов А. Н.* Теоретические основы и методы многомодельного прогнозирования долговечности сложных военно-технических систем космического назначения. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2000. – 430 с.

А. В. Немиров;
Н. В. Радионов,
доктор экономических наук, профессор;
А. А. Скопцов*;
А. В. Янгузов
*27 ЦНИИ МО РФ, г. Москва.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ЭНЕРГОПРИТОКА ДЛЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА, СНАБЖЕННОГО СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕЕЙ С ОДНОЙ СТЕПЕНЬЮ СВОБОДЫ

В статье представлена методика прогнозирования энергопритока от солнечных батарей бортовой системы электроснабжения космического аппарата для условий, когда ограничения на разворот панелей солнечных батарей не позволяют максимально эффективно преобразовывать энергию солнечного излучения. Предложено решение задачи оптимального поворота панелей солнечных батарей относительно корпуса космического аппарата, обеспечивающего наилучшие условия работы фотоэлектрических преобразователей. Показано, что оптимальное управление положением панелей солнечных батарей может увеличить генерируемую ими электрическую мощность и количество вырабатываемой электроэнергии в различных условиях засветки.

Ключевые слова: космический аппарат, бортовая система электроснабжения, энергоприток, система ориентации солнечной батареи, фотоэлектрический преобразователь.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в качестве основного вида энергии для работы бортовой аппаратуры современных космических аппаратов (КА) на орбите в околоземном пространстве используется электрическая энергия. Главным ее источником является излучение Солнца в видимом спектре, которое преобразуется с помощью фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) солнечных батарей (БС) КА. Причем условием наибольшей эффективности применения современных ФЭП является расположение конструкции плоскости БС перпендикулярно направлению потока солнечного излучения (перпендикулярно направлению на Солнце). Однако данное условие часто противоречит условию применения КА по назначению, при котором направление одной или нескольких связанных осей КА относительно Земли должно быть строго задано. В этом случае для устранения противоречия предусматривается возможность получения конструкцией БС как минимум двух степеней свободы поворота относительно корпуса КА.

Далее будут рассматриваться только классы КА, для которых выполняется требование постоянного направления одной из связанных осей к центру Земли. К таким КА относятся, например, КА дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), навигационные КА и некоторые типы КА связи, для которых необходимо постоянно разворачивать продольную ось КА по направлению местной вертикали (направлению радиуса вектора КА). Также с некоторыми допущениями к таким аппаратам можно отнести КА, совершающие межорбитальные перелеты с двигателями малой тяги и требующие определенной ориентации двигательной установки на всем протяжении маневра. При этом конструкция прикрепления БС к корпусу таких КА обычно позволяет осуществлять их поворот относительно двух других связанных осей. Таким образом, БС КА получают две степени свободы относительно корпуса (рис. 1). Не сложно проверить, что в таком случае двумя поворотами БС всегда можно добиться перпендикулярности падения солнечных лучей на поверхность БС, что и обеспечивает эффективное использование ФЭП и выработку максимально возможного количества электроэнергии на борту КА.

Однако преимущество в получении максимума энергопритока (притока лучистой энергии) для такой конструкции БС сопряжено с несколькими трудно устранимыми недостатками, главным из которых является нарушение стабилизации продольной оси КА в периоды работы специальной аппаратуры при одновременном осуществлении требуемых поворотов БС. Действительно, так как конструкция панелей БС для современных ФЭП обладает существенной массой, то согласно третьему закону Ньютона поворот БС относительно корпуса КА вызывает обратный эффект поворота корпуса. В свою очередь, это приводит к отклонению осей КА от требуемого в данный момент положения.

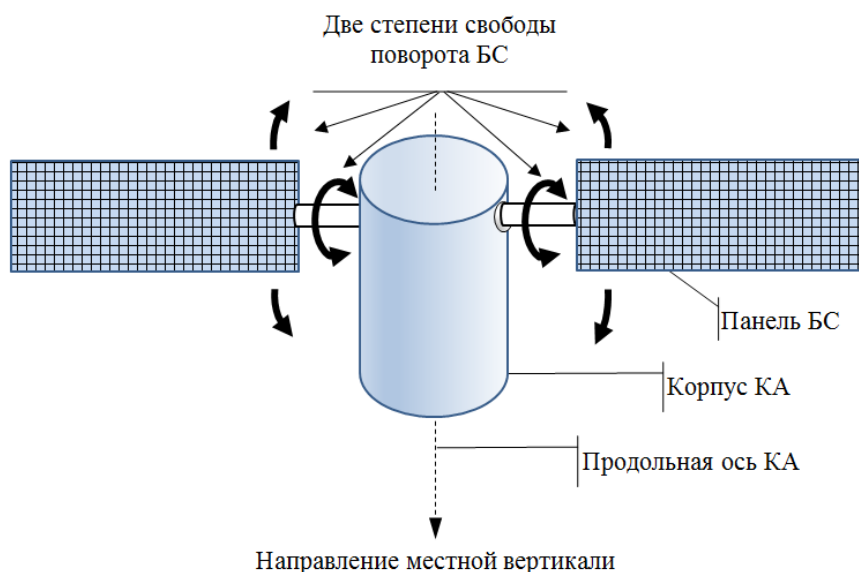


Рис. 1. Схема конструкции БС с двумя степенями свободы поворота относительно корпуса

Для устранения указанного недостатка в конструкции БС современных КА обычно предлагается два радикальных пути: либо вовсе отказаться от свободного вращения БС относительно корпуса КА, либо, оставив две степени свободы вращения, временно запрещать это вращение в периоды работы специальной аппаратуры. Причем первый путь в последнее время считается более перспективным, в основном из-за наибольшей простоты конструкции БС. Однако при этом возникает (порой неразрешимый) вопрос об эффективности работы БС при невозможности их разворота перпендикулярно потоку солнечного излучения. Частично этот вопрос решается увеличением (иногда чрезмерным) площади БС, при этом функцию поворота БС по направлению на Солнце обеспечивает собственно система управления угловым движением (СУУД) КА, но лишь в периоды дежурного режима полета. Несмотря на очевидную простоту таких решений, возрастают потери лучистой энергии, «недополученной» вследствие невозможности точного разворота БС перпендикулярно потоку. В результате происходит снижение величины электрической мощности БС и количества выработанной энергии системой электроснабжения КА, что может оказать негативное влияние на функционирование бортовой аппаратуры КА и выполнение им задач по предназначению [1, 2].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Падающая на БС световая мощность частично отражается от поверхностей ФЭП, но в основном поглощается ими и с некоторыми потерями превращается в электрическую. На

освещенном участке орбиты (ОУО) мгновенная мощность БС, соответствующая рабочей точке на текущей вольт-амперной характеристике (ВАХ), определяется формулой [1]

$$P_M = C \cdot \eta \cdot k_D \cdot k_\phi \cdot S \cdot \cos \varphi, \quad (1)$$

где C – плотность потока излучения Солнца ($C = 1396 \text{ Вт/м}^2$);
 η – КПД БС (зависящий от температуры панели, КПД ФЭП с учетом деградации и от КПД схемы соединения ФЭП в БС);
 k_D – коэффициент деградации вспомогательных элементов БС;
 k_ϕ – коэффициент, учитывающий отражающую способность БС;
 S – площадь панели БС;
 φ – угол отклонения нормали к поверхности БС от направления на Солнце.

Полагаем, что панель БС полностью и равномерно освещена падающим потоком излучения, а ее температура равна установившейся: $T = T_{\text{уст}}$. На теневом участке орбиты (ТУО) поток солнечного и отраженного излучения принимаем равным нулю.

Для решения задач планирования применения КА по назначению для расчетов обычно берут суточный период обращения КА по орбите, тогда среднее значение мощности БС за период $T_{\text{сут}}$ составит

$$P_{\text{БС}} = \frac{1}{T} \int_0^{T_{\text{сут}}} P_M(t) dt, \quad (2)$$

а количество выработанной энергии за тот же период времени –

$$W_{\text{БС}} = \int_0^{T_{\text{сут}}} P_M(t) dt. \quad (3)$$

В условиях одноосной стабилизации БС, когда панель БС не может быть точно ориентирована на Солнце, генерируемая БС электрическая мощность будет меняться со временем. Тогда, с учетом принятых допущений, величина $P_{\text{БС}}$ в значительной мере будет определяться углом φ :

$$P_{\text{БС}} = \frac{1}{T} \int_0^{T_{\text{сут}}} P_M(\cos \varphi(t)) dt. \quad (4)$$

При рассмотрении энергопотребления бортовых систем КА как периодической функции времени применяют витковые циклограммы генерации и нагрузки, которые отражают особенности функционирования элементов системы электроснабжения (СЭС) КА. Поэтому в рамках задачи нахождения максимума $P_{\text{БС}} \rightarrow \max$, $t \in [0, T_{\text{сут}}]$ необходимо найти максимум $\varphi(t)$ на каждом витке за время $T_{\text{вит}}$.

Рациональный путь решения задачи определения максимума $P_{\text{БС}}$:

$$|\cos \varphi(t) - 1| \rightarrow \min \quad \text{для } \forall t \in [0, T_{\text{вит}}]. \quad (5)$$

МЕТОДИКА УПРАВЛЕНИЯ ПАНЕЛЬЮ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С ОДНОЙ СТЕПЕНЬЮ СВОБОДЫ

Одним из альтернативных путей устранения указанных выше недостатков конструкции БС можно считать реализацию конструкции БС с одной степенью свободы (рис. 2). Данное решение может оказаться приемлемым, например для КА ДЗЗ. Действительно, рабочий режим данного КА связан с направлением продольной оси по местной вертикали и периодическим вращением относительно связанной оси, направленной по движению КА.

Если конструкция БС будет иметь одну степень свободы вращения относительно корпуса КА, тогда возможное расположение оси вращения БС по направлению движения КА позволяет обеспечить одновременно заданную точность стабилизации продольной оси КА и близость нормали плоскости БС к направлению потока лучистой энергии Солнца. Несмотря на то, что при этом уже невозможно точно ориентировать БС по направлению потока лучистой энергии, можно поставить рациональную задачу – задачу оптимального поворота БС относительно корпуса КА, обеспечивающего наилучшие условия работы ФЭП БС.

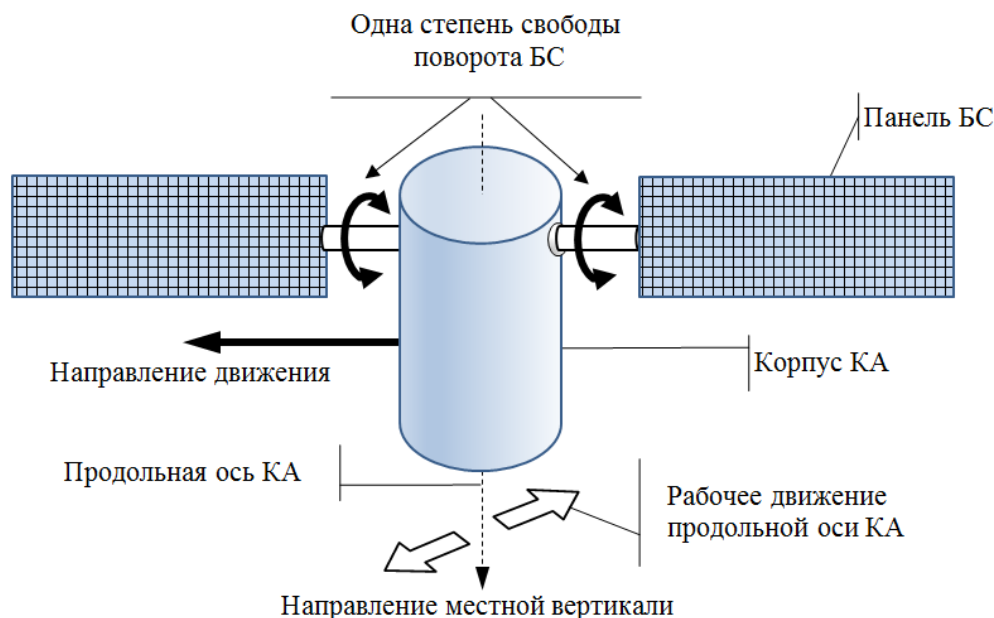


Рис. 2. Схема конструкции БС с одной степенью свободы поворота относительно корпуса

Решение данной задачи связано со следующим формальным требованием параллельности направления на Солнце и направления нормали к плоскости БС:

$$\vec{S} \cdot \vec{N}(\gamma) \rightarrow \max_{\gamma \in [-\pi, \pi]}, \quad (6)$$

где \vec{S} – орт мгновенного направления «КА – Солнце»;
 \vec{N} – орт мгновенного направления нормали к плоскости БС;
 γ – угол поворота БС относительно корпуса КА.

В данном случае обеспечить «естественный» максимум $\vec{S} \cdot \vec{N}(\gamma) = 1$ в любой момент времени уже невозможно. Однако можно минимизировать «естественные» потери

$$1 - \vec{S} \cdot \vec{N}(\gamma^*) \rightarrow \min,$$

где γ^* – решение задачи (6).

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО ПОВОРОТА БС

Следует отметить, что угол γ должен измеряться от какого-либо базового направления. Поэтому без потери общности таким направлением можно считать мгновенное направление местной вертикали КА (в направлении от центра Земли O_3 к центру масс КА). В дальнейшем для упрощения рассматривается идеальный случай совпадения местной вертикали с радиусом-вектором КА. Тогда с учетом условия направления оси вращения БС по направлению

движения КА угол γ фактически будет отсчитываться в плоскости, перпендикулярной плоскости движения КА. Геометрическое пояснение отсчета угла γ на единичной сфере в абсолютной геоцентрической экваториальной системе координат (АГЭСК) O_3XYZ показано на рис. 3. На этом рисунке отрезок O_3B представляет собой нормаль к БС \bar{N} после поворота на угол γ .

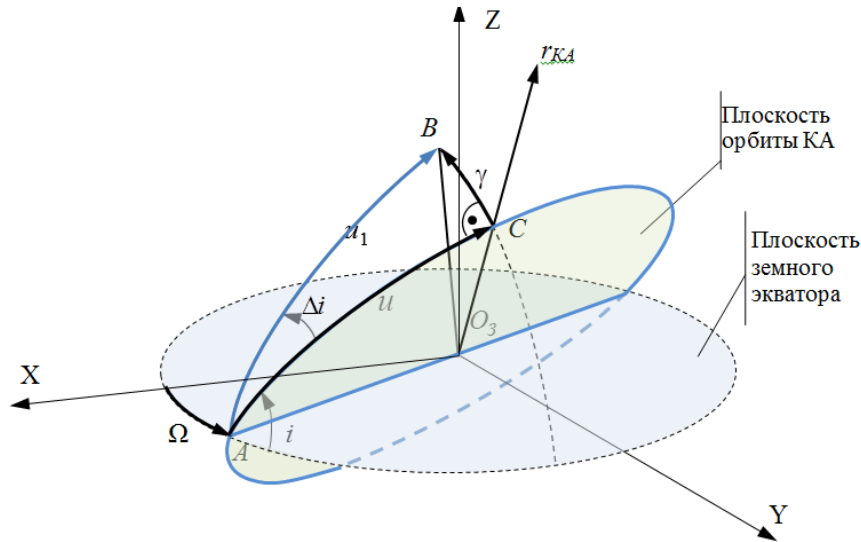


Рис. 3. Схема отсчета угла поворота нормали к БС

Учитывая, что в рассматриваемом случае начальное направление нормали к БС $\bar{N}(0)$ будет совпадать с направлением радиуса-вектора КА $r_{КА}$, после поворота БС на угол γ вектор нормали будет иметь следующие координаты в АГЭСК:

$$\begin{aligned} X &= \cos \Omega \cdot \cos u_1 - \sin \Omega \cdot \sin u_1 \cdot \cos(i \pm \Delta i); \\ Y &= \sin \Omega \cdot \cos u_1 + \cos \Omega \cdot \sin u_1 \cdot \cos(i \pm \Delta i); \\ Z &= \sin u_1 \cdot \sin(i \pm \Delta i), \end{aligned} \tag{7}$$

где из сферического треугольника ABC можно вычислить:

$$\begin{aligned} \cos u_1 &= \cos u \cdot \cos \gamma; \\ \cos \Delta i &= \frac{\sin u \cdot \cos \gamma}{\sqrt{1 - \cos^2 u \cdot \cos^2 \gamma}}. \end{aligned}$$

Здесь выражения $i \pm \Delta i$ формально означают возможность поворота БС в разные стороны относительно плоскости орбиты КА.

Если орт направления на Солнце в данный момент имеет координаты в АГЭСК $\bar{S} = [X_s, Y_s, Z_s]$, то в постановке задачи (5) можно записать:

$$\bar{S} \cdot \bar{N}(\gamma) = \cos \varphi = \alpha \cdot \cos \gamma + \beta \sin \gamma, \tag{8}$$

где

$$\begin{aligned} \alpha &= (X_s \cdot \cos \Omega + Y_s \cdot \sin \Omega) \cdot \cos u + \\ &+ [(Y_s \cdot \cos \Omega - X_s \cdot \sin \Omega) \cdot \cos i + Z_s \cdot \sin i] \cdot \sin u; \\ \beta &= (X_s \cdot \sin \Omega - Y_s \cdot \cos \Omega) \cdot \sin i + Z_s \cdot \cos i. \end{aligned}$$

Решением задачи (1) является либо $\gamma^* = \arctg \frac{\beta}{\alpha}$, либо $\gamma^* = 2 \cdot \pi - \arctg \frac{\beta}{\alpha}$ в зависимости от максимума из двух выражений:

$$\cos \varphi^* = \alpha \cdot \cos \left(\arctg \frac{\beta}{\alpha} \right) + \beta \cdot \sin \left(\arctg \frac{\beta}{\alpha} \right);$$

$$\cos \varphi^{**} = \alpha \cdot \cos \left(2\pi - \arctg \frac{\beta}{\alpha} \right) + \beta \cdot \sin \left(2\pi - \arctg \frac{\beta}{\alpha} \right),$$

соответствующих повороту $+\Delta i$ и $-\Delta i$.

При этом оптимальное направление орта нормали к панели БС $\bar{N}(\gamma^*)$ определяется следующими координатами:

$$\begin{aligned} X_{\text{СБ}} &= (\cos \Omega \cdot \cos u - \sin \Omega \cdot \sin u \cdot \cos i) \cdot \cos \gamma^* + \sin \Omega \cdot \sin i \cdot \sin \gamma^*; \\ Y_{\text{СБ}} &= (\sin \Omega \cdot \cos u + \cos \Omega \cdot \sin u \cdot \cos i) \cdot \cos \gamma^* - \cos \Omega \cdot \sin i \cdot \sin \gamma^*; \\ Z_{\text{СБ}} &= \sin u \cdot \sin i \cdot \cos \gamma^* + \cos i \cdot \sin \gamma^*. \end{aligned} \quad (9)$$

МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ЭНЕРГОПРИТОКА

В качестве основного показателя энергопритока возьмем генерируемую БС электрическую мощность $P_{\text{БС}}$ на интервале $[0, T_{\text{ВИТ}}]$. Ограничения на ориентацию БС, связанные с ее одноосной ориентацией и расположением оси вращения БС по направлению движения КА, существенно влияют как на мощность, генерируемую БС, так и на количество энергии, вырабатываемое системой электроснабжения КА. Решение задачи оптимального поворота БС относительно корпуса КА позволяет рассчитать величину $\cos \varphi$ в любой момент времени и тем самым прогнозировать потенциальный энергоприток. Пример расчета изменения $\cos \varphi$ за один виток для низкоорбитального КА на круговой орбите с наклоном 51° в условиях ограничения на разворот БС (сплошная линия) и без ограничений (пунктирная линия) представлен на рис. 4.

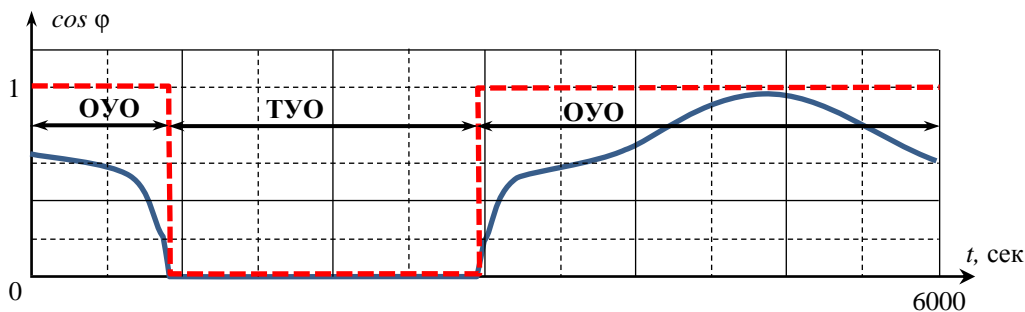


Рис. 4. График изменения $\cos \varphi$ для низкоорбитального КА

Для заданных параметров орбиты среднеинтегральное значение $\cos \varphi$ будет равно 0,48 и 0,65 соответственно. На низких орбитах существенное влияние на генерацию электроэнергии оказывает чередование ОУО и ТУО. Увеличение ТУО со снижением высоты орбиты приводит к уменьшению среднеинтегрального значения $\cos \varphi$ за один виток.

Электрическая мощность, отдаваемая БС во внешнюю цепь, определяется параметрами, зависящими от ее текущего состояния: ВАХ, зависящей от параметров падающего на панель потока излучения S (плотность потока и угол φ), установившейся температурой панели БС $T_{\text{УСТ}}$ и положением рабочей точки на ней, зависящей от структуры с СЭС, напряжения на шинах и тока БС [1, 5]. При значениях $\cos \varphi$ ниже максимального необходимо учитывать влияние защитного, просветляющего и других покрытий на поверхности БС, наличие которых приводит к увеличению ее отражательной способности. Так, при углах свыше 40° лучистый поток будет частично отражаться, а свыше 80° – полностью.

Коэффициент k_φ определяется следующим образом:

$$k_\varphi = \begin{cases} 0, & \text{если } \cos \varphi \leq 0,12 \\ a_1 \cdot \cos \varphi \cdot \left(1 - \frac{a_2 \cdot \cos \varphi}{1 - \cos \varphi}\right), & \text{если } 0,12 < \cos \varphi \leq 0,75, \\ \cos \varphi, & \text{если } \cos \varphi > 0,75 \end{cases} \quad (10)$$

где a_1, a_2 – коэффициенты, зависящие от типа и количества покрытий на поверхности БС и определяемые экспериментально.

Тогда генерируемый БС фототок I_Φ прямо пропорционален освещенности, поэтому с учетом отражения от поверхности панели

$$I_\Phi = k_\varphi \cdot I_{\Phi 0}, \quad (11)$$

где $I_{\Phi 0}$ – фототок;

k_φ – коэффициент, учитывающий отражательную способность БС.

Для анализа режимов работы БС и расчета ее выходной мощности при различных условиях работы можно использовать одну из известных математических моделей ФЭП, например модель фотоэлектрического преобразователя с сосредоточенными параметрами [3–5], которая определяет следующее выражение для ВАХ ФЭП:

$$I = k_\varphi I_{\Phi 0} - I_{\text{ОН}} \left\{ \exp \left[\frac{q(U + I_c R_{\text{П}})}{AkT} - 1 \right] \right\} - \frac{U + I_c R_{\text{П}}}{R_{\text{Ш}}}, \quad (12)$$

где I – ток нагрузки ФЭП;

$I_{\text{ОН}}$ – обратный ток насыщения;

q – заряд электрона;

U – напряжение ФЭП;

$R_{\text{П}}$ – последовательное сопротивление тела полупроводника и контактной сетки ФЭП;

$R_{\text{Ш}}$ – параллельное сопротивление схемы замещения, определяющее ток внутренней утечки;

k – постоянная Больцмана;

A – эмпирический параметр, получаемый при сравнении теоретических и экспериментальных кривых ВАХ и принимающий значения 1–5.

Для генерирования максимальной мощности панелью БС необходимо осуществлять выбор и управление рабочей точкой на текущей ВАХ БС – определение относительных координат точки максимальной мощности и регулирование тока БС по определенному закону. Управление током нагрузки БС возможно только для СЭС КА с последовательно-параллельной структурой и использованием экстремального регулятора мощности (ЭРМ) БС. Причем в СЭС КА другой структуры или без ЭРМ управление рабочей точкой ВАХ невозможно. Кроме того, в таких СЭС при низких значениях $\cos \varphi$ вследствие пониженного напряжения на выходе БС возможно полное отключение БС от шин нагрузки.

В СЭС КА с ЭРМ генерируемая мощность БС максимальная и определяется параметрами точки максимальной мощности U_M и I_M . Для этого ЭРМ так изменяет напряжение, ток и мощность, отбираемые зарядным устройством (ЗУ) от БС, чтобы суммарный ток БС, распределяющийся между ЗУ и стабилизатором напряжения (СН), обеспечивал в любой момент времени на данной ВАХ напряжение БС $U_{\text{БС}}(t) = U_M(t)$. В СЭС КА без ЭРМ рабочая точка на ВАХ определяется циклограммой нагрузки и текущим состоянием аккумуляторной батареи (АБ), поэтому генерируемая электрическая мощность постоянно меняется и всегда меньше максимально возможной.

Таким образом, расчет электрической мощности, генерируемой БС для СЭС с ЭРМ, сводится к определению параметров текущей ВАХ (трех характеристических точек U_M , I_M и

P_M) для заданных параметров функционирования панели БС ($\cos \varphi$, $T_{уст}$) на заданном периоде времени.

Пример расчета изменения генерируемой мощности за один виток СЭС низкоорбитального КА на круговой орбите с наклоном 51° без ограничений на разворот панелей БС и СЭС с ЭРМ (пунктирная линия) в условиях ограничения на разворот БС и СЭС с ЭРМ (сплошная линия) и в условиях ограничения на разворот БС и СЭС без ЭРМ (штрихпунктирная линия) представлен на рис. 5. Значение номинальной мощности P_H рассчитывается на ОУО для $\cos \varphi = 1$ и установившегося теплового режима БС в СЭС с ЭРМ.

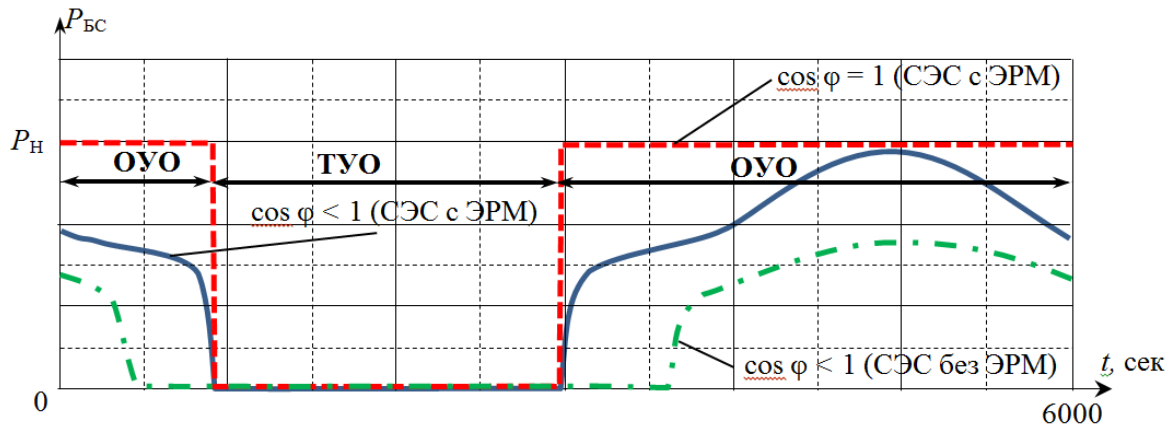


Рис. 5. График изменения генерируемой мощности СЭС КА различной структуры и при разных значениях $\cos \varphi$

Теневые участки орбиты, ограничения на разворот БС, невозможность использования всей энергии падающего излучения вследствие структурных ограничений СЭС и другие факторы, отрицательное влияние которых уменьшить не представляется возможным, существенно влияют на количество и качество энергии, доступной потребителям на борту КА. В настоящее время ведутся работы по разработке космических систем передачи энергии посредством электромагнитного (лазерного) излучения [5–7]. Применение таких космических энергостанций (КЭС) позволяет обеспечить поступление лучистой энергии на панели БС КА при нахождении КА на ТУО при невозможности эффективного преобразования солнечного излучения из-за ограничений на разворот БС вследствие работы специальной аппаратуры или длительных периодов работы двигателей малой тяги.

Особенности размещения КЭС в околоземном пространстве приведут к определенной неравномерности (по сравнению с потоком излучения Солнца) поступления энергии на панели БС. Это связано с взаимным относительным движением КА и КЭС и периодическим нахождением Земли между ними. Кроме того, для обеспечения непрерывного поступления энергии на всех витках целесообразно размещение в околоземном пространстве нескольких таких КЭС и осуществление приема энергии от одной или нескольких КЭС с наилучшими условиями передачи.

Для расчета мощности БС и выработанной ее мощности за заданный период времени при приеме энергии от КЭС можно воспользоваться формулами (1)–(4) с учетом отличий потока излучения КЭС с помощью соответствующих коэффициентов. Пример расчета изменения $\cos \varphi$ за один виток низкоорбитального КА на круговой орбите с наклоном 51° при ограничениях на разворот БС (сплошная линия) и без ограничений (пунктирная линия) в условиях приема лучистой энергии (ЛЭ) на ТУО от КЭС и солнечного излучения (СИ) на ОУО показан на рис. 6 (мощность потока лазерного излучения КЭС была принята равной потоку солнечного излучения). Среднеинтегральное значение $\cos \varphi$ за один виток в таких условиях будет 0,58 и 0,79 соответственно.

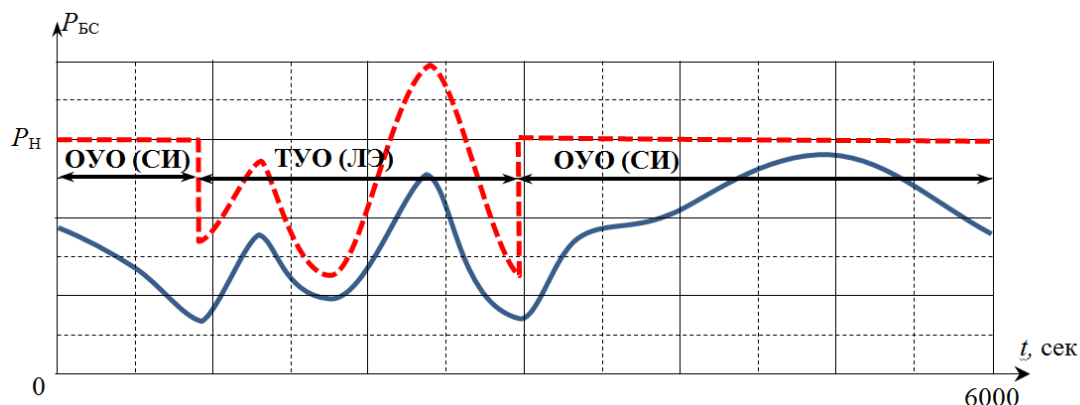


Рис. 6. График изменения генерируемой мощности СЭС КА различной структуры при приеме энергии от разных источников

Решение задачи по оптимальному повороту БС по направлению потока лучистой энергии от КЭС показывает, что существует возможность увеличить генерируемую электрическую мощность БС на витке за счет их использования на ТУО даже в условиях одноосной ориентации БС. На ОУО также можно использовать прием энергии от КЭС, например при низких значениях $\cos \varphi$, однако необходимо обеспечивать заданный температурный режим панелей солнечных батарей [8].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная методика прогнозирования позволяет оптимизировать показатель энергопритока, тем самым увеличить генерируемую электрическую мощность БС и количество вырабатываемой энергии СЭС за счет рационального управления поворотом БС на каждом витке полета КА.

Оптимальный разворот БС по предложенной методике также может применяться и в других случаях:

- в условиях ограничений на развороты КА с двух- и трехосной ориентацией БС;
- в случае жесткого крепления БС к корпусу КА или их размещения на корпусе КА, когда управление ориентацией БС осуществляется разворотом самого корпуса КА;
- в случае частичного затенения БС корпусом КА или другими его элементами.

Оптимальное управление поворотами БС может быть использовано для синхронизации разворотов БС и программных разворотов корпуса КА с целью снижения момента трения и демпфирования возникающих при разворотах колебаний, но требует дополнительных исследований.

Перспективным направлением увеличения энергопритока является прием БС КА дистанционно передаваемой энергии от космических энергостанций на теневых участках полета КА или в условиях невозможности приема лучистой энергии от Солнца.

Список используемых источников

1. Системы электроснабжения космических аппаратов и ракет-носителей : учеб. пособие / В. А. Власов [и др.]. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2013. – 116 с.
2. Системы электропитания космических аппаратов / Б. П. Соустин [и др.]. – Новосибирск : ВО «Наука». Сибирская издательская фирма, 1994. – 318 с.

3. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 360 с.
4. Разработка алгоритма построения вольт-амперных характеристик солнечных батарей космического аппарата дистанционного зондирования Земли при наличии частичного затенения / С. В. Алуев [и др.] // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2017. – Вып. 667. – С. 369–376.
5. Стеганов Г. Б., Безняков А. М., Немиров А. В. Влияние дистанционного энергоснабжения космического аппарата на тепловые режимы солнечных батарей // Вестник Самарского университета. – 2022. – Т. 21, № 1. – С. 14–23.
6. Легостаев В. П., Лопота В. А., Синявский В. В. Перспективы и эффективность применения космических ядерно-энергетических установок и ядерных электроракетных двигательных установок // Космическая техника и технологии. – 2013. – № 1. – С. 4–15.
7. Перспективы использования беспроводной передачи электрической энергии в космических транспортных системах / А.С. Грибков [и др.] // Известия РАН. Энергетика. – 2009. – № 2. – С. 118–123.
8. Безняков А. М., Немиров А. В., Стеганов Г. Б. Математическая модель канала электропотребления космического аппарата в условиях неравномерного потребления энергии // Космическая техника и технологии. – 2020. – № 3. – С. 56–64.

А. И. Петухов;
А. Э. Султанов,
кандидат технических наук

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МУЛЬТИМОДЕЛЬНОГО ПОДХОДА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОДОЛЬНЫХ АВТОКОЛЕБАНИЙ В РАКЕТАХ-НОСИТЕЛЯХ

Проведен анализ различных подходов к моделированию продольных колебаний в корпусах ракет-носителей на этапе выведения космического аппарата. Отмечены положительные стороны подходов, а также их ограничения в отношении исследований автоколебательных процессов. Обосновано использование комплексного мультимодельного подхода к формированию математических моделей сложных автоколебательных систем с существенно-нестационарными параметрами, к которым относятся ракеты-носители в условиях полета. Показана высокая степень сходимости рассмотренных методов математического моделирования на базовом примере.

Ключевые слова: продольные колебания, моделирование, верификация.

ВВЕДЕНИЕ

При создании новых средств выведения, а также в ряде случаев при модернизации ракет-носителей (РН) возникает задача обоснования проектных параметров как основных систем, так и средств обеспечения продольной устойчивости данного типа летательных аппаратов. Причем в зависимости от сложности компоновки РН, потребности обеспечения специфических требований, таких как модульность, унификация, наличие средств спасения ступеней и др., возникает необходимость доработки научно-методического аппарата прогнозирования запаса динамической устойчивости для выбранного проекта. Причем, чем более уникальным является разрабатываемое средство выведения или чем глубже степень доработок в рамках их модернизации, тем выше требования к сложности математического аппарата, лежащего в основе методик проектирования данного типа технических устройств. К программным комплексам, обладающим сложным математическим аппаратом, относятся системы компьютерной математики *Matlab-Simulink* и *SimInTech*, ряд систем инженерного анализа (*Ansys*, *Logos* и др.), а также среды программирования.

В связи с развитием программных средств, которые способны решать задачу исследования колебаний различных динамических систем, возникает задача выбора оптимального пути моделирования сложных автоколебательных систем, таких как жидкостные ракеты-носители. Задача комбинирования различных подходов в исследовании автоколебательных процессов лежит в области улучшения показателей ресурсоемкости для методов обоснования рациональных направлений совершенствования существующей системы средств выведения космических аппаратов как в интересах обеспечения обороноспособности страны, так и для повышения конкурентоспособности отечественных РН на мировом рынке пусковых услуг.

В рамках выполненного исследования проведен анализ трудоемкости разработки рассмотренных расчетных моделей, в том числе специфики подготовки для них исходных данных, точности получаемых результатов в сравнении с данными аналитической модели.

Об актуальности проведенных исследований свидетельствует опережение развития возможностей современных вычислительных средств по отношению к моделям и методам продольных автоколебаний в нестационарных динамических системах, таких как ракеты-носители на этапе активного участка траектории. Существует потребность повышения точности воспроизведения зависимостей запаса динамической продольной устойчивости от

конструктивных параметров корпусов РН при известных параметрах их двигательных установок.

АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОДОЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ

В настоящий момент разработана и используется широкая номенклатура методов моделирования продольных автоколебаний в ракетах-носителях. Методы моделирования могут быть классифицированы как по подходу к описанию распределения по длине ракеты ее массово-жесткостных свойств, так и по способу получения решения.

В частности, широко используется подход к исследованию свойств динамических систем, к которым относятся ракеты-носители, основанный на методах малых относительных отклонений. Метод позволяет получить аналитическое решение для оценки запаса динамической устойчивости на базе анализа передаточных функций, получаемых на основе характеристического уравнения системы [1]. Такой подход позволяет для систем относительно малой размерности получить точечные оценки решения с малыми затратами вычислительных ресурсов.

Вместе с тем в последнее время с развитием вычислительной техники все большее распространение получает направление, связанное с использованием имитационных динамических моделей. Такой подход базируется на использовании систем компьютерной математики и позволяет исследовать поведение динамических систем большой сложности, в том числе с учетом нелинейностей в связях.

Для проверки сходимости различных подходов к моделированию продольных колебаний корпуса РН в ходе исследований была использована схема простейшей динамической системы, состоящей из трех сосредоточенных масс и двух упругих элементов (рис. 1).

Особенность колебаний корпуса ракет-носителей с баками, частично заполненными жидкостью, в продольном направлении связана со спецификой силового взаимодействия топлива и днищ. При колебаниях малой интенсивности (без нарушения сплошности) жидкого топлива последнее допустимо считать жестко связанным с колеблющимся нижним днищем [2].

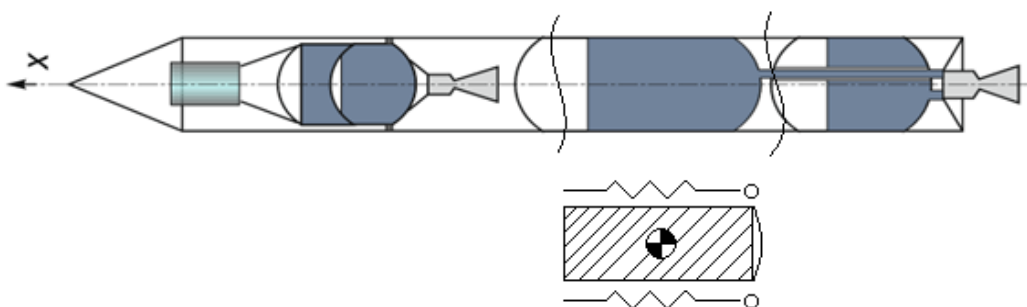


Рис. 1. Схема продольных колебаний ракеты-носителя

Методом конечных элементов производится дискретизация объема, занимаемого телом, на элементарные области: для объемного тела – на тетраэдры с гранями, аппроксимируемыми линейными или параболическими функциями координат; для поверхностных моделей – плоскими или криволинейными (параболическая зависимость от координат) треугольниками. Эти области и есть «конечные элементы» (рис. 2).

В методе начальных параметров распределенную нагрузку принимают действующей до конца балки, а чтобы не нарушить условия нагружения, в сечении, где заканчивается реальная нагрузка, прикладывают равную по величине распределенную нагрузку противополож-

ного направления, также действующую до конца балки. Существует недостаток: момент пары сил умножают на фиктивное плечо в нулевой степени.

Метод интегрирования дифференциальных уравнений позволяет рассчитывать геометрические конфигурации, к которым не применимы простые расчетные методы на основе аналитических решений. Определение геометрии или рабочей точки возможно только методом итераций, поскольку уравнения необратимы.

С распределенными параметрами	С сосредоточенными параметрами	Методы получения решения
+	-	Метод конечных элементов
+	-	Метод начальных параметров
-	+	Метод дифференциальных уравнений
-	+	Аналитический метод

Рис. 2. Схема взаимосвязей подходов к моделированию продольных колебаний

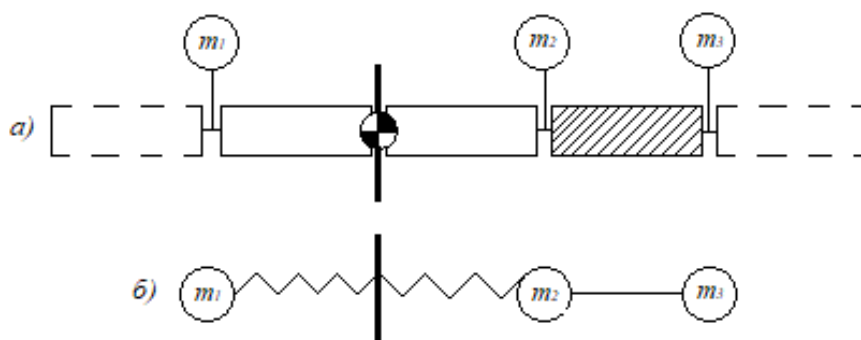


Рис. 3. Расчетные схемы продольных колебаний корпуса ракеты-носителя:
а – модель с распределенными параметрами; б – модель с сосредоточенными параметрами

Аналитический метод предусматривает постоянный пересчет состояния системы, так как дает результат в данный момент времени. Основан на применении анализа, т. е. на разложении целого на составные части и рассмотрении каждой из них отдельно с целью более глубокого познания целого через его составные части (рис. 3).

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОДОЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Метод конечных элементов относится к численному методу приближенного решения краевых (граничных) задач. В простейшей постановке краевая задача является математической задачей, в которой одна или несколько зависимых переменных должны удовлетворять дифференциальному уравнению в известной области независимых переменных и удовлетворять определенным условиям, заданным в границах этой области.

Для текущего исследования конечно-элементная модель создана в среде инженерного анализа *SolidWorks Simulation* в виде набора блоков, соединенных невесомой пружиной. Сте-

пени свободы системы ограничены сопряжениями типа «симметрия» по соответствующим граням модели. Решение системы искалось в виде оценок частот и форм продольных колебаний вдоль оси X (рис. 4).

Для исследования влияния на частоты колебаний массы элемента, моделирующего бак с топливом проведена серия расчетов с различными геометрическими параметрами блока «С», при этом блок «А» и блок «В» являются константами.

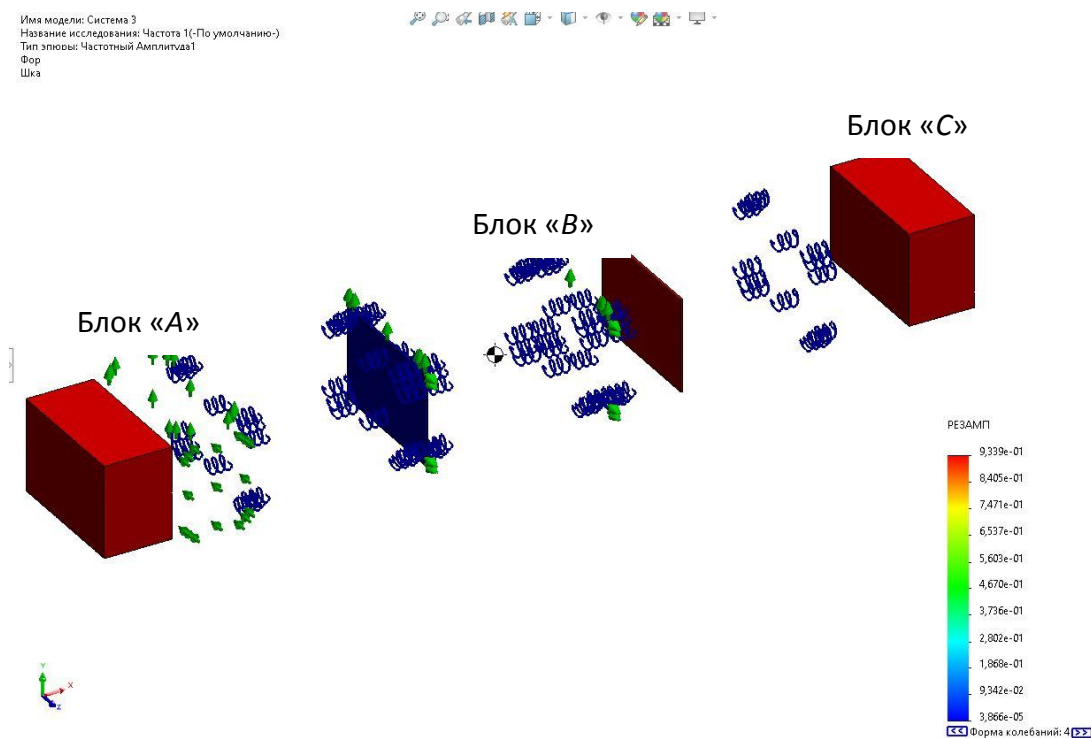


Рис. 4. Результаты моделирования в программной среде SolidWorks

Использование системы *SolidWorks* позволяет учесть в модели колебаний геометрические особенности отдельных элементов корпуса ракет-носителей, такие как форма вафельной обечайки, замена силового набора классического клепаного на фрезерованный. Мульти-модельный подход предусматривает описание различных специфических свойств автоколебательной системы «корпус ракеты – топливные магистрали – двигатель» с помощью различных методов моделирования. Таким образом, мульти-модельный подход складывается из дополнения одной модели другой или их комбинированного использования для эффективного и быстрого получения результата в задаче оценки продольной устойчивости колебательной системы, оценки запаса динамической устойчивости путем проведения численного эксперимента и проверки сходимости [3].

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕТОДОМ НАЧАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Метод сводится к выбору порядка численного метода решения. Порядок численного метода не связан с порядком дифференциального уравнения. В случае большого интервала с помощью алгоритмов с низким порядком сжимают интервал с решениями и находят приближительные корни с помощью методов с высоким порядком.

В методе начальных параметров отсутствует использование пружин. Вместо них использованы так называемые стержни. Получается модель с распределенными параметрами, где

EF – распределенная жесткость. В реальном процессе использование пружин – упрощение ($EF=kl$), поэтому метод начальных параметров максимально соответствует реальности. Аналитические методы максимально далеки от реальности вследствие использования абстракций, так как применяются сосредоточенные параметры.

Оценка запаса динамической устойчивости путем применения метода начальных параметров позволяет без использования жесткости отсеков рассчитать, насколько изменится запас динамической устойчивости в первом приближении, и пересчитать на жесткость изменение формы днища [4].

Данная модель имеет следующий недостаток: принятые ограничения в виде формирования масс в форме материальных точек на конечном участке моделирования дают существенную погрешность, поэтому массы, заданные искусственно для визуализации процесса, должны быть минимизированы до уровня, когда ими можно пренебречь (0,01–0,001 кг).

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕТОДОМ ИНТЕГРИРОВАНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ (SIMULINK)

Специфика колебаний ракеты-носителя связана с выносом переменной массы по отношению к точке передачи силы (рис. 5 и 6).

На рис. 7 показаны графики всех моделей. Линия – «аналитические расчеты», совпадающие с *Matlab*, квадрат – *SolidWorks*, круг – *Simulink*. Коэффициент взаимной корреляции равен 0,96.

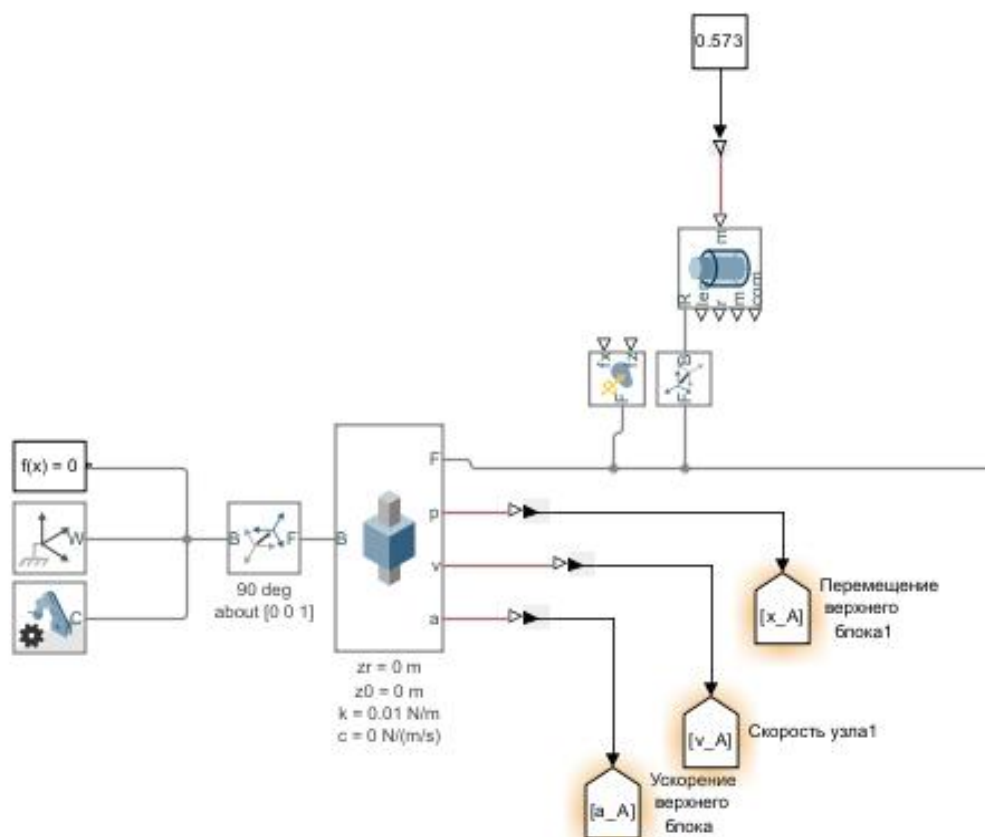


Рис. 5. Блок-схема в программной среде Simulink

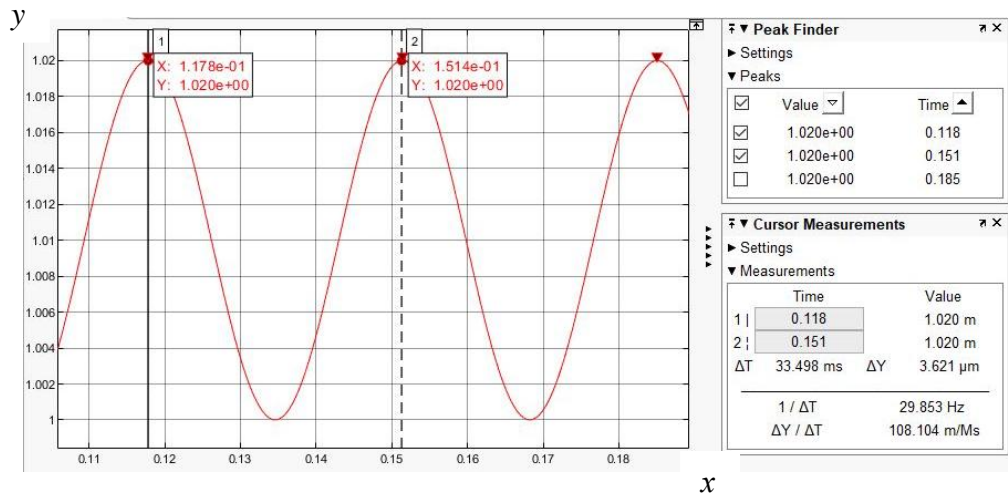


Рис. 6. Результаты моделирования в программной среде Simulink

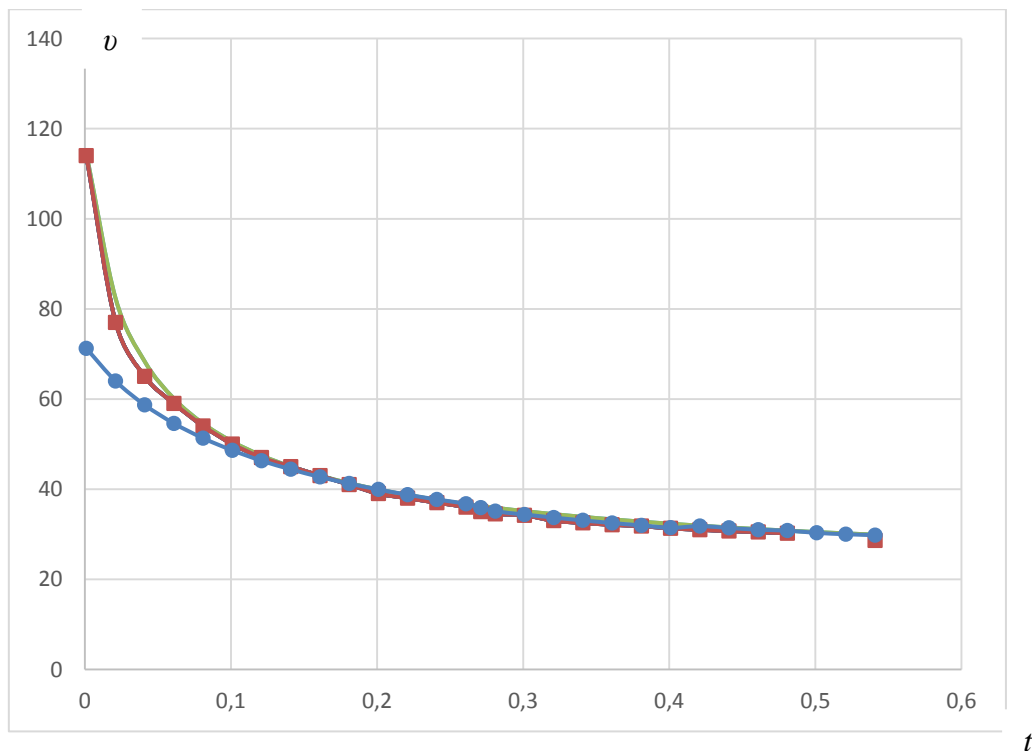


Рис. 7. Анализ сходимости результатов моделирования различными методами

Из данного графика (рис.7) видно, что метод начальных параметров точно совпадает с аналитическим методом, поэтому они изображены одной линией.

КОМБИНИРОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОДОЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ В РАКЕТАХ-НОСИТЕЛЯХ

Учитывая сложность ракеты-носителя как колебательной системы возникает потребность обоснования структуры комплексирования различных подходов описания ее динамических свойств, что может потенциально способствовать снижению общих затрат на проведение исследований в области выявления значимых закономерностей влияния отдельных конструктивных параметров РН на частотные характеристики ее корпуса [5].

Исходя из анализа особенностей конструкции РН, можно сделать вывод о предпочтительном использовании того или иного метода моделирования продольных колебаний применительно к ее составным элементам, к которым относятся:

- 1) космический аппарат (использование сосредоточенных и распределенных параметров) – использование метода конечных элементов;
- 2) сухие отсеки (использование сосредоточенных параметров) – использование метода интегрирования дифференциальных уравнений;
- 3) баки (в зависимости от формы: большого удлинения и малого удлинения, простой и сложной формы) – комбинирование метода конечных элементов и метода интегрирования дифференциальных уравнений;
- 4) рамные конструкции – использование метода конечных элементов;
- 5) двигатели – комбинирование метода конечных элементов и метода интегрирования дифференциальных уравнений;
- 6) топливные магистрали – использование метода конечных элементов.

Так, например, для длинных составных баков первых ступеней РН, для которых характерно существенное изменение жесткости по длине, применим подход замены составного неоднородного стержня на эквивалентный с некоторой жесткостью k_{Σ} . Следовательно,

$$EF_{\text{ЭКВ}} = k_{\Sigma}L_{\text{б}}, \quad (1)$$

где E – модуль упругости материала;

$L_{\text{б}}$ – длина бака.

Тогда

$$k = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{k_i}}, \quad (2)$$

где k – эквивалентная жесткость;

k_i – жесткость участка.

Формулы (1) и (2) являются основными для расчета продольных колебаний и позволяют произвести аналитические расчеты, представленные выше на графиках (см. рис. 7).

В то же время для баков малого удлинения в ряде случаев характерна более сложная форма (рис. 8), оценка жесткости которой возможна, главным образом, с использованием геометрического моделирования и, соответственно, на основе метода конечных элементов.

Следует заметить, что экспериментально, а затем и теоретически было показано, что стержневая модель неадекватно описывает упругие характеристики «тандемного» (с последовательным соединением ступеней) корпуса. Существенное влияние на низшие тона колебаний корпуса оказывают осесимметричные колебания оболочек топливных баков, заполненных жидким топливом [6].



Рис. 8. Сложный торoidalный бак ЖРД «РД-120»

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в результате проведенного сравнительного анализа различных методов моделирования продольных колебаний динамической системы, воспроизводящей изменение частотных характеристик элемента ракеты-носителя, показана высокая степень их взаимной корреляции. Сходимость результатов моделирования позволяет формировать комбинированные математические модели продольных колебаний ракет-носителей, учитывающие специфику описания исходных данных в различных пакетах прикладных программ, обеспечивающие минимизацию временных и финансовых затрат при создании динамических моделей.

Список используемых источников

1. Швейко Ю. Ю. Сравнительный анализ частот упругих колебаний конструкций некоторых ракет-носителей по результатам их натурных испытаний и испытаний конструктивно подобных моделей // Космонавтика и ракетостроение. – 2007. – Вып. 2 (47). – С. 131–133.
2. Особенности анализа телеметрической информации о перегрузках, получаемых при летной эксплуатации изделий ракетно-космической техники / А. Ю. Бондаренко [и др.] // Космонавтика и ракетостроение. – 2019. – № 4(109). – С. 48–53.
3. Рабинович Б. И. Введение в динамику ракет-носителей космических аппаратов. – М. : Машиностроение, 1975. – 416 с.
4. Николаев А. Д., Н. В. Хоряк Н. В. Определение параметров собственных продольных колебаний конструкции корпуса жидкостных ракет-носителей с учетом диссипации энергии // Ракетно-космическая техника и технология. – 2004. – Вып. 4/12. – С. 62–73.
5. Лебедев Е. Л., Перфильев А. С., Султанов А. Э. Анализ параметров вибрационного нагружения корпуса ракет-носителей как фактора повышения интенсивности выработки ресурса сварных соединений топливных баков // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 671. – С. 161–167.
6. Балакирев Ю. Г. Методология определения динамических характеристик гидроупругих систем применительно к проблемам устойчивости продольных колебаний жидкостной ракеты в полете и динамического поведения амортизируемых объектов при кинематическом возбуждении : автореф. дис. канд. техн. наук. – г. Королев, 1997. – 27 с.

Г. П. Полозов*;

А. М. Попов;

В. В. Шмелев,

доктор технических наук, доцент

*1 ГИК МО РФ, г. Мирный.

МЕТОДИКА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ АПРИОРНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

В статье представлен научно-методический аппарат идентификации состояния технических систем при априорной неопределенности условий их испытаний и применения. Аппарат включает теоретико-множественную модель объекта и процесса распознавания состояния на основе последовательного метода контроля технического состояния и диагностирования сложных систем. Новизной предложенного материала являются учет ограниченных возможностей измерительных средств, а также разработка порядка получения количественной оценки полноты информации, на основе которой принимается решение о состоянии наблюдаемой технической системы.

Ключевые слова: техническая система, идентификация, контроль, диагностика, измерительная информация.

ВВЕДЕНИЕ

Диагностирование технических систем в ряде прикладных случаев необходимо проводить в условиях значительной недостаточности измерительной информации. В качестве примера с учетом принципиальной схожести задач диагностирования и распознавания образов следует привести задачу распознавания космических объектов (КО) отечественного и зарубежного происхождения. В настоящее время осуществляется непрерывное наблюдение за отечественными КО с целью контроля их состояния. Зарубежные КО контролируются с целью их распознавания, т. е. селекции, идентификации и определения характеристик, целевого назначения и государственной принадлежности. В силу объективных причин, зачастую, данную задачу приходится решать в условиях значительной априорной недостаточности исходных данных об исследуемом объекте на основе комплексной обработки разнородной информации, полученной различными средствами. В таком случае методический аппарат распознавания типа КО должен обеспечивать выполнение задачи по ограниченному вектору оцениваемых характеристик.

СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

Следует охарактеризовать классическую задачу диагностирования и задачу диагностирования в условиях априорной неопределенности.

Классическая задача диагностирования. При полной наблюдаемости объекта контроля всегда возможно определение его состояния по данным измерений сигналов на его выходах. Измерения в этом случае являются диагностическими признаками (ДП). Конечной целью диагностирования является определение одного из строго и однозначно заданных видов технического состояния (ТС) контролируемой системы. Каждому виду ТС объекта соответствует определенное подмножество его текущих состояний, характеризующееся интервалом значений параметров.

При диагностировании в условиях априорной неопределенности существует недостаточность исходных данных, выражающаяся в невозможности построения полного множества

возможных видов ТС и недоступности получения некоторых необходимых ДП. Схема процесса диагностирования представлена на рис. 1.

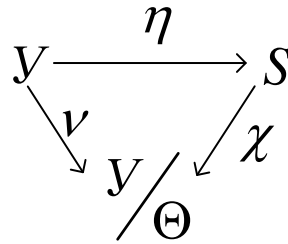


Рис. 1. Схема процесса диагностирования

В классической задаче диагностирования [1–4] формируется вектор результатов контроля $Y \in \mathcal{Y}$. Множество \mathcal{Y} возможных векторов результатов контроля разбивается оператором факторизации ν на непересекающиеся классы \mathcal{Y}/Θ . Конкретный возможный вид ТС из множества S с помощью оператора биекции χ взаимно-однозначно сопоставляется с соответствующим классом из \mathcal{Y}/Θ . Диагностирование заканчивается определением оператора сюръекции η , с помощью которого вектор результатов контроля $Y \in \mathcal{Y}$ сопоставляется определенному виду ТС из множества S .

При недостаточности исходных данных отношение между соответствующими множествами иные. Множество \mathcal{Y} наблюдаемых ранее векторов Y значений ДП факторизуется на непересекающиеся классы \mathcal{Y}/Θ , которые составляют фактор-множество изображений кластеризованных специалистами видов ТС. Множество S – множество возможных видов ТС, которое состоит из наблюдавшихся и идентифицированных ранее типов. В случае недостаточности априорной информации о диагностируемой системе невозможно составить такое множество видов ее ТС, которое включало бы все возможные виды. Поэтому множество S не охватывает все возможные виды ТС. В этом случае оператор η будет обладать свойством инъективности. Оператор η из оператора инъекции переводится в оператор сюръекции дополнением множества изображений существующих видов ТС S изображением неизвестного вида S_0 , охватывающего ранее не наблюдавшиеся и не идентифицированные ТС. Данное дополнение отобразится на множество \mathcal{Y}/Θ дополнением его подмножеством значений ДП, включающим интервалы значений ДП, не принадлежащие ни одному из кластеризованных ранее видов и соответствующие типу S_0 . Тип S_0 является следствием априорной неопределенности и самой системы, и условий ее диагностирования, испытаний и применения.

В классической задаче диагностирования технического объекта возможно принятие решения о виде ТС за количество проверок ДП меньшее, чем все доступные [2–4], так как χ – оператор взаимно-однозначного соответствия и, если однозначно определен класс фактор-множества \mathcal{Y}/Θ , то ему однозначно соответствует один и только один элемент множества S – вид ТС объекта. При сокращении количества проверок используются ряд критериев, что позволяет получать решение о ТС с максимальной оперативностью, информативностью, достоверностью или минимальной ресурсоемкостью [2–5].

При диагностировании в условиях априорной неопределенности может наблюдаться ситуация, когда вектор Y измерений ДП по проверенным признакам принадлежит изображению $S_i \in S$ одного вида \mathcal{Y}/Θ , а по остальным – принадлежит другому $S_r \in S, i \neq r$, вплоть до

неизвестного S_0 . Это становится возможным по причине неизвестности соотношения множества возможных видов ТС S и множества кластеризованных видов Y/Θ . Поэтому, остановившись, не проверив все ДП, возможно пропустить новое состояние контролируемой системы, идентифицировав его как ранее кластеризованный вид ТС. Для учета данной особенности при диагностировании всегда должны выполняться проверки всех доступных ДП.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что в настоящее время хорошо проработаны вопросы контроля и диагностирования ТС для случая полной определенности множеств S и Y/Θ . Задача диагностирования в условиях частичной априорной неопределенности множеств S и Y/Θ сейчас не решена.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задача формулируется в рамках моделей объекта M_O и процесса M_{Π} распознавания вида ТС контролируемой системы, которые представляются в виде множеств $M_O = \{S, \Pi, L, \Phi\}$ и $M_{\Pi} = \{Y, \Omega, \Pi, \mathfrak{R}\}$, где введены следующие обозначения:

$S = \{S_i \mid i = \overline{0, m}\}$ – множество изображений кластеризованных экспертами видов ТС, особенностью объекта контроля является недостаточность исходных данных, выражающаяся в неполноте множества изображений возможных видов ТС. Для обозначения неизвестного вида ТС, информация о котором отсутствует, вводится изображение S_0 гипотетического нового вида;

$\Pi = \{\pi_j \mid j = \overline{1, n}\}$ – множество ДП, в качестве которых используются характеристики контролируемой системы. В связи с ограничением на практике технических возможностей по оцениванию всех n ДП следует учитывать возможность принятия решения о виде ТС $S_i \in S$ по меньшему множеству ДП $\Pi_f = \{\pi_j \mid j = \overline{1, n_f}\}$, $n_f < n$;

$L = \{l_{ij} \mid i = \overline{0, m}; j = \overline{1, n}\}$ – множество интервалов, установленных опытным путем, каждый из которых определяет границы изменения ДП $\pi_j \in \Pi$ в изображении кластеризованного вида ТС $S_i \in S$;

$\Phi: S \times \Pi \rightarrow L$ – отображение, устанавливающее связь между множествами изображений $S = \{S_i \mid i = \overline{0, m}\}$ и ДП $\Pi = \{\pi_j \mid j = \overline{1, n}\}$, с одной стороны, и множеством интервалов значений ДП $L = \{l_{ij} \mid i = \overline{0, m}; j = \overline{1, n}\}$, с другой стороны, такое, что $l_{ij} = \Phi(S_i, \pi_j)$, $l_{ij} \in L$, $S_i \in S$, $\pi_j \in \Pi$;

$Y = \left\{ Y \mid Y = (y_1, \dots, y_j, \dots, y_n)^T \right\}$ – множество, элементами которого являются векторы распознавания вида ТС контролируемой системы – векторы значений ДП $\Pi = \{\pi_j \mid j = \overline{1, n}\}$;

$\Omega = \{R \mid R \subseteq S\}$ – алгебра событий, заданная на множестве $S = \{S_i \mid i = \overline{0, m}\}$, в которой элементы R – это состояния моделируемого процесса диагностирования [называемые также ин-

формационными или фазовыми состояниями (ФС)], включающие совокупность в количестве от 1 до $(m + 1)$ «подозреваемых» видов ТС $S_i \in S$;

$P = \{P(R) | R \in \Omega\}$ – вероятностная мера, заданная на алгебре событий Ω ;

$\mathfrak{R} = \{R_i | i = \overline{0, m}\}$ – множество решений о виде ТС $S_i \in S$ идентифицируемой системы, совпадающее со множеством $S = \{S_i | i = \overline{0, m}\}$ и обозначающее конечные ФС.

Требуется:

1. Разработать порядок распознавания вида ТС контролируемой системы по множеству изображений $S = \{S_i | i = \overline{0, m}\}$ в условиях априорной неопределенности условий испытаний и применения системы по вновь полученному вектору $Y = (y_1, \dots, y_j, \dots, y_n)^T$ оценок ДП $\pi_j | j = \overline{1, n}$.

2. Оценить информационную полноту разработанного порядка распознавания с учетом соотношения информационной ценности использованных при этом ДП из множества Π_f и оставшейся неопределенности вследствие существования недоступных для оценивания ДП из множества Π/Π_f .

Систематизируем учитываемые при решении задачи допущения и ограничения:

1. В отличие от известной [1–4] классической постановки задачи диагностирования, исключается допущение о попарной различимости изображений S_0 и остальных $S_i | i = \overline{1, m}$ видов ТС по совокупности заданных ДП $\pi_j \in \Pi$ вследствие введения во множество S изображения S_0 неизвестного вида ТС.

2. Функция правдоподобия $P(Y | S_i), i = \overline{0, m}$ имеет равномерный закон распределения. Поэтому распределение измеренных значений элементов y_j ДП $\pi_j \in \Pi, j = \overline{1, n}$, в интервалах $l_{ij} \in L, i = \overline{0, m}$, полагается равномерным.

3. Каждый ДП $\pi_j \in \Pi$ имеет ограниченный интервал возможных значений $y_j \in [y_j^{\min}; y_j^{\max}]$, который выбирается из практической реализуемости системы с соответствующими значениями ДП.

СОДЕРЖАНИЕ МЕТОДИКИ

Решение поставленной задачи включает следующие этапы:

1. Формирование изображений $S = \{S_i | i = \overline{0, m}\}$ видов ТС в виде множества интервалов $L = \{l_{ij} | i = \overline{0, m}; j = \overline{1, n}\}$, элементы которого определяются как интервалы значений ДП $\pi_j \in \Pi$, соответствующие видам ТС.

2. Вычисление значений элементов вектора распознавания $Y = (y_1, \dots, y_j, \dots, y_n)^T$ из множества Y .

3. Формирование порядка распознавания вида ТС контролируемой системы. Распознавание должно осуществляться и в случае непринадлежности наблюдаемого ТС ни к одному из

изображений кластеризованных ранее видов ТС $S = \{S_i | i = \overline{1, m}\}$, т. е. она должна определять гипотетическое изображение нового вида ТС – S_0 .

4. Определение вида ТС системы. С использованием полученного вектора $Y = (y_1, \dots, y_j, \dots, y_n)^T$ значений ДП $\pi_j \in \Pi$ определяется вид ТС системы с учетом возможности принадлежности ТС наблюдаемой системы к ранее не наблюдавшемуся виду.

5. Количественное оценивание полноты информации, на основе которой принято решение о виде ТС S_i .

Рассмотрим этапы методики.

Этап 1. Кластеризация ранее наблюдавшихся ТС по видам производится на основе всестороннего комплексного анализа измерительной информации, зачастую экспертами в полуавтоматизированном режиме. Формализованно определяются параметры функции правдоподобия по известным формулам математической статистики: вычислить только два параметра функции распределения для ее полного определения – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение σ .

Непосредственные значения $l_{ij} | i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}$ множества интервалов L формируются в результате статистической обработки векторов множества $Y = \{Y | Y = (y_1, \dots, y_j, \dots, y_n)^T\}$, полученных ранее. Как случайная величина интервал l_{ij} определяется точечными оценками центра интервала и оценками границ интервала на шкале допустимых значений ∇_j оценок y_j ДП π_j . Центр C_{ij} интервала l_{ij} формируется как среднее арифметическое оценок y_j ДП π_j для вида ТС $S_i | i = \overline{1, m}$. Интервал l_{ij} ограничивается тремя среднеквадратическими отклонениями $3\sigma_{ij}$ от центра интервала C_{ij} , формируемыми в предположении о нормальном распределении ошибки вычисления y_j ДП π_j для вида ТС $S_i | i = \overline{1, m}$. Таким образом, длина Δ_{ij} интервала l_{ij} вычисляется следующим образом:

$$\Delta_{ij} = (C_{ij} + 3\sigma_{ij}) - (C_{ij} - 3\sigma_{ij}), | i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}. \tag{1}$$

Шкала допустимых значений ∇_j оценок y_j ДП π_j ограничивается минимальным значением y_j^{\min} и максимальным значением y_j^{\max} (рис. 2), являющимися предельными физически реализуемыми значениями ДП π_j .

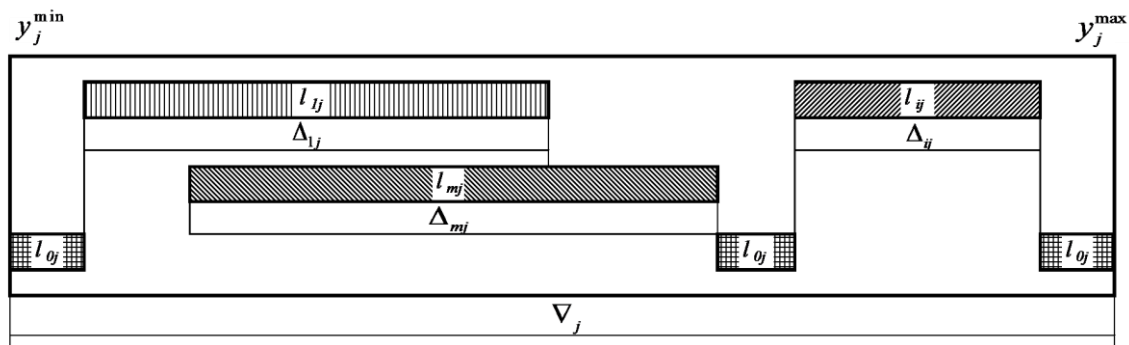


Рис. 2. Графическое изображение интервальных характеристик $l_{ij} | i = \overline{0, m}$ для ДП π_j

Значения $l_{ij} | i=0$ множества интервалов L для ДП π_j формируются следующим образом. Указанные интервалы являются разностью шкалы допустимых значений ∇_j оценок y_j ДП π_j и интервала, полученного в результате объединения всех интервалов $l_{ij} | i = \overline{1, m}$. То есть для Δ_{0j} можно записать:

$$\Delta_{0j} = \nabla_j - \bigcup_{i=1}^m \Delta_{ij}. \quad (2)$$

Этап 2. Вектор распознавания $Y = (y_1, \dots, y_j, \dots, y_n)^T$ формируется на основе полученной измерительной информации и существующих математических моделей контролируемой системы. Элементами данного вектора являются числовые значения ДП $\pi_j \in \Pi$. Значениями ДП могут быть как непосредственные результаты измерений, так и результаты обработки измерений, т. е. «косвенные» измерения или результаты вычислений.

Этап 3. Порядок распознавания является инструментом уменьшения степени неопределенности знания о виде ТС контролируемой системы. В работе [1] принято называть порядок определения вида ТС программой. Программа состоит из фазовых состояний программы и соединяющих данные состояния результатов проверок ДП. Дадим определения понятиям «фазовое состояние» программы и «проверка» ДП.

В результате анализа измерительной, априорной и другой доступной информации о распознаваемом объекте определяются оценки характеристик и формируется вектор распознавания, состоящий из значений y_j соответствующих ДП π_j . Программа распознавания вида ТС представляет собой последовательную проверку всех ДП из множества Π . Под проверкой понимается сопоставление значения элемента y_j вектора Y со значениями границ интервалов l_{ij} , определяющих i -й вид ТС S_i по j -му ДП π_j . Исходом проверки j -го ДП π_j называется событие, заключающееся в определении принадлежности вычисленного значения y_j к одному из выделенных интервалов Δ_{ij} на вещественном одномерном пространстве, соответствующем при пересечении нескольким $l_{ij}, i : S_i \in R$.

Фазовым состоянием (ФС) программы распознавания называется множество «подозреваемых» сочетаний изображений $S_i \in S$ видов ТС, с точностью до которых возможно определить вид ТС после проверки очередного ДП. Начальное состояние программы характеризуется полной неопределенностью знания о виде ТС наблюдаемой системы. Начальное состояние обозначается как $R_\omega = \{S_0, \dots, S_m\}$, далее определим индекс ω .

Для формирования программы в начальном ФС выполняется проверка первого ДП π_1 . После проверки данного ДП запоминаются полученные ФС R_k (исходы), где k – порядковый индекс полученных ФС, которые будут содержать, очевидно, меньшее количество «подозреваемых» видов ТС, т. е. $R_k \subseteq S$. Затем опять в начальном ФС должен проверяться второй ДП π_2 и так до перебора всех элементов ДП множества Π . Полученные ФС запоминаются. Таким образом, добавлением к заданным ранее ФС R_0, R_1, \dots, R_m формируется множество ФС $R = \{R_0, R_1, \dots, R_m, \dots, R_k, \dots, R_\omega\}$. В данном множестве ФС: R_0 – ФС программы распознавания, в котором делается вывод о новом, ранее не наблюдавшемся виде ТС S_0 системы, R_1, \dots, R_m – ФС программы распознавания, в которых делается вывод об отнесении ТС контролируемой

системы только к одному из ранее наблюдавшихся видов ТС $S_i | i = \overline{1, m}$, $R_{m+1}, \dots, R_k, \dots, R_\omega$ – ФС программы распознавания, в которых делается вывод об отнесении наблюдаемой системы к подмножеству типов $R_k \subseteq S$ мощностью от 2 до $(m+1)$.

Графически синтезированную программу можно представить ориентированным деревом, в котором имеется одна вершина – начальное ФС и конечное множество полученных ФС, ветвями в дереве являются исходы проверок ДП.

Этап 4. Решение $R_i \in \mathfrak{R}$ о виде ТС S_i анализируемой системы принимается после анализа полученных ФС $R = \{R_0, R_1, \dots, R_m, \dots, R_k, \dots, R_\omega\}$. ТС системы относится к виду, изображение S_i которого есть во всех полученных на этапе 3 ФС $R_k, j = \overline{0, \omega}$, т. е.

$$R_i = \bigcap_{k=0}^{\omega} R_k. \quad (3)$$

В формуле (3) возможны несколько типов результатов в зависимости от мощности результата пересечения в правой части формулы.

ТС наблюдаемой системы относится к известному виду ТС $S_i, i = \overline{1, m}$, если все значения вектора распознавания $Y = (y_1, \dots, y_j, \dots, y_n)^T$ всех ДП $\pi_j, j = \overline{1, n}$ попадают в интервалы $l_{ij}, i: S_i \in R$ только одного ранее наблюдавшегося вида ТС S_i . В этом случае $\text{card} \left(\bigcap_{k=0}^{\omega} R_k \right) = 1$ и $R_i = S_i, i = \overline{1, m}$.

ТС системы относится к новому, ранее не наблюдавшемуся виду S_0 , если все значения вектора распознавания $Y = (y_1, \dots, y_j, \dots, y_n)^T$ всех ДП $\pi_j, j = \overline{1, n}$ попадают в интервалы l_{0j} только вида ТС S_0 . В этом случае $\text{card} \left(\bigcap_{k=0}^{\omega} R_k \right) = 1$ и $R_i = S_0$.

Если $\bigcap_{k=0}^{\omega} R_k = \emptyset$, т. е. $\text{card} \left(\bigcap_{k=0}^{\omega} R_k \right) = 0$, то ТС контролируемой системы также может относиться к новому, ранее не наблюдавшемуся виду S_0 . Данный результат требует дополнительных исследований, для чего должно быть принято решение либо о наблюдении ТС системы нового вида S_0 , который необходимо перевести в множество существующих видов в виде элемента S_{m+1} с формированием интервалов l_{m+1j} , либо о наблюдении ТС существующего вида $S_i, i = \overline{1, m}$ с пересмотром элементов множества $L = \{l_{ij} | i = \overline{0, m}; j = \overline{1, n}\}$, с тем чтобы расширить границы какого-либо вида ТС до включения в него ТС наблюдаемой системы.

Если $\text{card} \left(\bigcap_{k=0}^{\omega} R_k \right) > 1$, то сделать однозначный вывод о виде ТС наблюдаемой системы невозможно. В этом случае необходимо вводить в рассмотрение новые ДП, с тем чтобы по вновь вводимым ДП отличить друг от друга виды ТС, входящие в $\bigcap_{k=0}^{\omega} R_k$.

Этап 5. В связи с изменениями условий испытаний и применения контролируемой системы, а также условий доступа к измерительной информации по различным причинам на практике может быть уменьшено количество элементов в векторе распознавания. При этом множества $S = \{S_i | i = \overline{0, m}\}$ и $L = \{l_{ij} | i = \overline{0, m}; j = \overline{1, n}\}$ формируются по полному множеству

$\Pi = \{\pi_j | j = \overline{1, n}\}$. А уже вектор распознавания Y будет содержать значения ДП из множества $\Pi_f = \{\pi_j | j = \overline{1, n_f}\}$, $n_f < n$. Таким образом, возникает задача оценивания полноты программы распознавания с учетом соотношения информационной ценности использованных при этом ДП из множества Π_f и оставшейся неопределенности вследствие существования недоступных для оценивания ДП из множества $\Pi \setminus \Pi_f$.

ДП π_j имеют различную информативность, которая зависит от их вероятностных характеристик. Вероятность попадания значения y_j ДП π_j в границы интервала Δ_{ij} равна p_{ij} , при этом сумма вероятностей p_{ij} для всех видов ТС, включая новый вид, должна быть равна единице:

$$\sum_{i=0}^m p_{ij} = 1; j = \overline{1, n}. \quad (4)$$

Вероятность p_{ij} с учетом (4) рассчитывается по формуле

$$p_{ij} = \frac{\Delta_{ij} / \nabla_j}{\sum_{i=0}^m \Delta_{ij} / \nabla_j} = \frac{\Delta_{ij}}{\sum_{i=0}^m \Delta_{ij}}; i = \overline{0, m}; j = \overline{1, n}. \quad (5)$$

Знаменатель в формуле (5) позволяет выполнить нормировку вероятностей в условиях, когда два или несколько интервалов $l_{ij} | i = \overline{1, m}$ пересекаются, например, как интервалы l_{1j} и l_{mj} на рис. 2. При решении классической задачи контроля и диагностирования ТС [1–3] на шкале допустимых значений ∇_j оценок y_j ДП π_j предполагается размещение только одного интервала l_j длиной Δ_j . В таком случае знаменатель в формуле (5) равен единице и не учитывается. Знаменатель в формуле (5) также будет равен единице, если интервалы $l_{ij} | i = \overline{1, m}$ не пересекаются.

Попадания каждой из полученных оценок вектора распознавания $Y = (y_1, \dots, y_j, \dots, y_n)^T$ в соответствующий интервал $l_{ij}, i: S_i \in R$ являются независимыми событиями. ТС наблюдаемой системы относится к известному виду $S_i, i = \overline{1, m}$ только при совместном появлении событий, при которых все значения y_j попадут в интервалы Δ_{ij} , соответствующие одному виду ТС S_i существующего типа. Вероятность наблюдения вида ТС S_i вычисляется как произведение вероятностей p_{ij} :

$$P_i = \prod_{j=1}^n p_{ij}; i = \overline{1, m}. \quad (6)$$

Противоположное событие определяется как разность:

$$Q_i = 1 - P_i; i = \overline{1, m}. \quad (7)$$

Здесь Q_i – вероятность того, что ТС системы не принадлежит виду $S_i, i = \overline{1, m}$ (принадлежит другому существующему виду $S_k; k = \overline{1, m}; k \neq i$ или новому виду S_0).

Для определения информационной ценности использованных при распознавании вида ТС

ДП из множества Π_f и оставшейся неопределенности вследствие существования недоступных для оценивания ДП из множества $\Pi \setminus \Pi_f$ используется формула информационной энтропии [5]. Программа распознавания только одного вида ТС до проверки ДП обладает неопределенностью, вычисляемой по следующей формуле:

$$H_i = -P_i \log_2(P_i) - Q_i \log_2(Q_i); i = \overline{0, m}. \quad (8)$$

Тогда при наблюдении неизвестного объекта состояние программы характеризуется полной информационной неопределенностью (энтропией) H_0 . Исходная полная энтропия определяется как сумма энтропий H_i для всего множества существующих видов ТС $S_i, i = \overline{0, m}$:

$$H_0 = \sum_{i=0}^m H_i. \quad (9)$$

Формула (9) учитывает событие, при котором ТС наблюдаемого объекта принадлежит одному из известных видов $S_i, i = \overline{1, m}$ и противоположное ему событие, при котором ТС принадлежит другому известному виду $S_k; k = \overline{1, m}; k \neq i$ либо новому, ранее не наблюдававшемуся S_0 .

Каждый из ДП π_j обладает некоторой информативностью, показывающей количество информации, полученной об объекте по результатам его проверки. После каждой последующей проверки снимается некоторое количество неопределенности. Из множества существующих проверок Π могут быть проведены только доступные Π_f . Множество Π_F недоступных проверок оставляет неопределенность H_F . Неопределенность I_f , снятая в результате оценивания n_f доступных ДП, или информативность n_f ДП оценивания определяются формулой

$$I_f = H_0 - H_F. \quad (10)$$

Оставшаяся неопределенность H_F рассчитывается по следующему выражению:

$$H_F = \sum_{i=1}^m \left(\left(\prod_{j \in \Pi_f} p_{ij} \right) \left(- \prod_{j \in \Pi_f} p_{ij} \log_2 \left(\prod_{j \in \Pi_f} p_{ij} \right) - \left(1 - \prod_{j \in \Pi_f} p_{ij} \right) \log_2 \left(1 - \prod_{j \in \Pi_f} p_{ij} \right) \right) \right). \quad (11)$$

Выражение (11) представляет собой сумму по всем видам ТС, каждое слагаемое является произведением вероятности наблюдения по ДП из множества Π_f вида ТС S_i и неопределенности, снимаемой оставшимися ДП из множества Π_F .

В качестве количественной оценки полноты V распознавания воспользуемся отношением снятой неопределенности I_f к исходной неопределенности H_0 состояния программы

$$V = \frac{I_f}{H_0} \quad (12)$$

или с учетом (10)

$$V = 1 - \frac{H_F}{H_0}. \quad (13)$$

Подставив выражения (6)–(9) и (11) в формулу (13) для расчета количественной оценки полноты распознавания, получим

$$V = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m \left(\left(\prod_{j \in \Pi_f} p_{ij} \right) \left(- \left(\prod_{j \in \Pi_f} p_{ij} \right) \log_2 \left(\prod_{j \in \Pi_f} p_{ij} \right) - \left(1 - \prod_{j \in \Pi_f} p_{ij} \right) \log_2 \left(1 - \prod_{j \in \Pi_f} p_{ij} \right) \right) \right)}{- \left(\prod_{j=1}^n p_{ij} \right) \log_2 \left(\prod_{j=1}^n p_{ij} \right) - \left(1 - \prod_{j=1}^n p_{ij} \right) \log_2 \left(1 - \prod_{j=1}^n p_{ij} \right)}. \quad (14)$$

Значение показателя полноты находится в прямой зависимости от количества оцененных ДП. Подразумевается, что принятие решения о виде ТС контролируемой системы может производиться только при условии, что значение показателя полноты будет не ниже некоторого требуемого значения $V \geq V_{\text{ТР}}$, при котором результат распознавания считается достоверным. Полученной измерительной информации может оказаться недостаточно для формирования множества Π_f , необходимого для принятия решения с превышением требуемого значения полноты. В таком случае возникает задача повышения полноты информации до требуемого уровня $V_{\text{ТР}}$. Количество полученной информации о наблюдаемой системе будет зависеть не только от полноты вектора распознавания, но и от информативности каждого его элемента. Предлагаются следующие пути повышения полноты распознавания:

1. Увеличение информативности используемых ДП из множества Π_f . Информативность может быть повышена для ДП π_j за счет уменьшения интервалов $\Delta_{ij}; i = \overline{1, m}$, что достигается снижением инструментальной и (или) методической погрешности оценивания ДП π_j , использованием других исходных данных или средств измерения.

2. Расширение множества ДП Π_f за счет оценивания дополнительных ДП из множества $\Pi \setminus \Pi_f$.

Оба пути формально ведут к уменьшению числителя дроби в формуле (14) за счет уменьшения произведения $\prod_{j \in \Pi_f} p_{ij}; i = \overline{1, m}$.

ПРИМЕР ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИКИ

Пусть множество изображений видов ТС состоит из четырех элементов $S = \{S_i | i = \overline{0, 3}\}$, множество проверяемых ДП состоит из $n = 5$ элементов $\Pi_f = \{\pi_j | j = \overline{1, 5}\}$. В результате применения измерительных средств нового типа получены дополнительные исходные данные, позволяющие выполнить оценивание дополнительных, ранее не оцениваемых ДП, в результате чего количество ДП увеличено на два элемента $\Pi = \{\pi_j | j = \overline{1, 7}\}$, а для ДП π_2 уменьшилась погрешность σ_{i2} расчета y_2 , что позволило изменить интервальную оценку меры разброса $\Delta_{i2}^{\text{II}} < \Delta_{i2}^{\text{I}}$. Множество интервалов $L = \{l_{ij} | i = \overline{0, 3}; j = \overline{1, 7}\}$ и другие исходные данные приведены в табл. 1. Для ДП π_2 приведены: I – исходный интервал значения l_{i2} ; II – оценка интервала после уменьшения погрешности расчета ДП π_2 .

При распознавании вида ТС в зависимости от состава множества $\Pi_f \subseteq \Pi$ будут реализованы различные программы распознавания. В качестве примера на рис. 3 в виде графа представлена программа определения вида ТС. Для множества $\Pi_f = \{\pi_j | j = \overline{1, 5}\}$ данная программа содержит ФС $R_k, k = \overline{0, 31}$. Решение о принадлежности состояния системы одному из видов $S = \{S_i | i = \overline{1, 3}\}$ может быть принято только в 15 ФС: $R_9, R_{12}, R_{14}, R_{15}, R_{18}, R_{20}, R_{21}, R_{23}, R_{24}, R_{25}, R_{27}, R_{28}, R_{29}, R_{30}, R_{31}$.

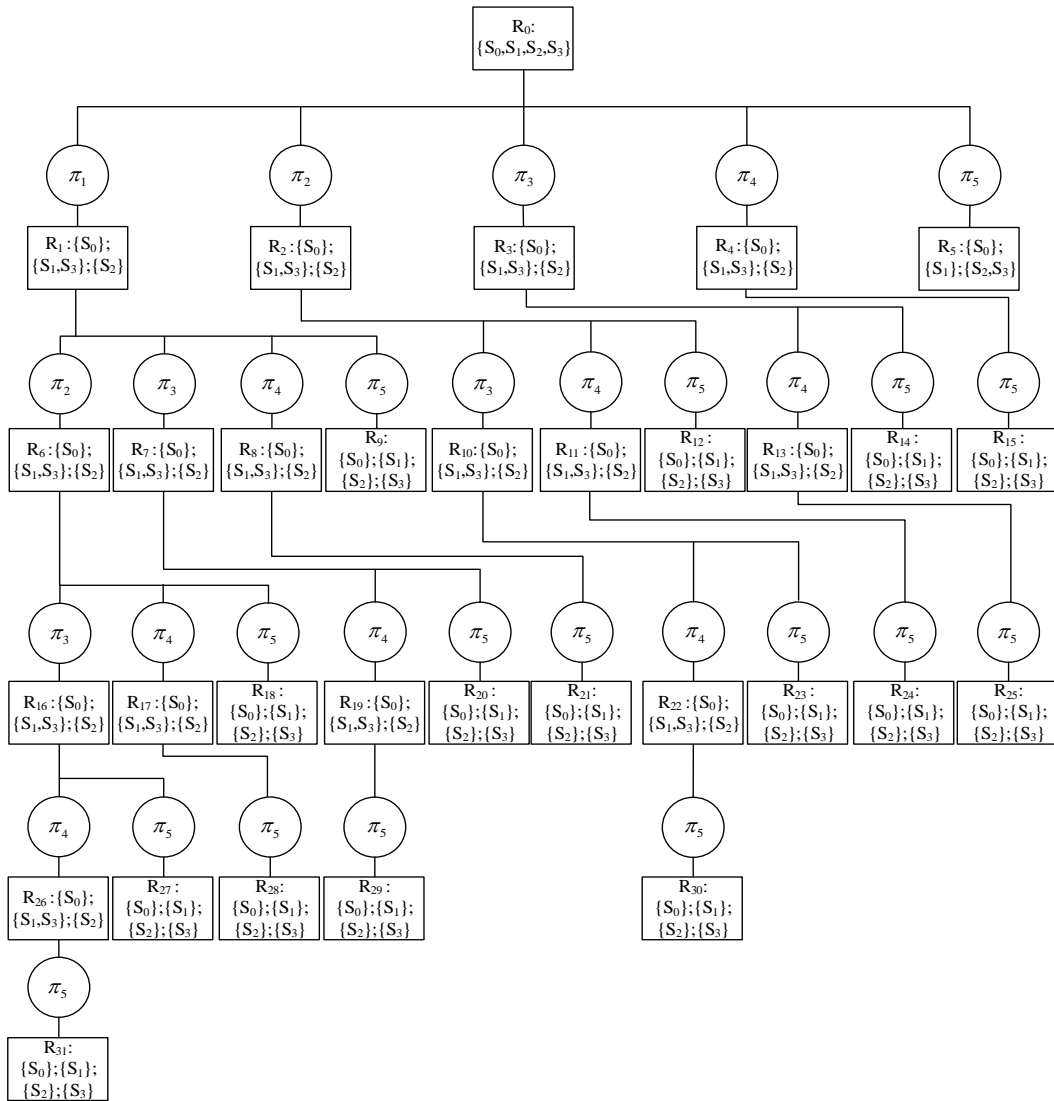


Рис. 3. Граф программы распознавания ТС для множества ДП П

Таблица 1

Исходные данные для распознавания вида ТС

ДП		S_0	S_1	S_2	S_3		
П	Π_f	π_1	$(0; 0,3) \cup (0,5; 0,8) \cup (0,9; 1)$	$(0,3; 0,5)$	$(0,8; 0,9)$	$(0,3; 0,5)$	
		2		$(0; 0,4) \cup (0,8; 1)$	$(0,5; 0,7)$	$(0,6; 0,8)$	$(0,4; 0,6)$
			I	$(0; 0,5) \cup (0,6; 0,7) \cup (0,8; 1)$	$(0,5; 0,6)$	$(0,7; 0,8)$	$(0,5; 0,6)$
		π_3	$(0,1; 0,2) \cup (0,7; 1)$	$(0,2; 0,7)$	$(0,0; 0,1)$	$(0,2; 0,7)$	
		π_4	\emptyset	$(0,0; 0,4)$	$(0,2; 1,0)$	$(0,0; 0,4)$	
		π_5	$(0; 0,3) \cup (0,4; 0,7) \cup (0,8; 1)$	$(0,3; 0,4)$	$(0,7; 0,8)$	$(0,7; 0,8)$	
		π_6	$(0,5; 1)$	$(0,0; 0,4)$	$(0,3; 0,5)$	$(0,2; 0,4)$	
	π_7	$(0,6; 1)$	$(0,0; 0,2)$	$(0,2; 0,4)$	$(0,4; 0,6)$		

Для примера рассчитаем значение полноты V информации, использованной при переходе в ФС R_{23} .

Исходную энтропию H_0^I для множества $\Pi_f = \{\pi_j | j = \overline{1,5}\}$ при значениях интервалов ДП π_2 в варианте I рассчитаем по формуле (9), для чего сначала определим вероятности (6). Тогда будем иметь следующие вычисления:

$$P_1^I = \prod_{j=1}^5 p_{1j} = \frac{(0,5-0,3)}{1,2} \cdot \frac{(0,7-0,5)}{1,3} \cdot \frac{(0,7-0,2)}{1,5} \cdot \frac{(0,4-0,0)}{1,6} \cdot \frac{(0,4-0,3)}{1,1} = 1,194 \cdot 10^{-3};$$

$$P_2^I = \prod_{j=1}^5 p_{2j} = \frac{(0,9-0,8)}{1,2} \cdot \frac{(0,8-0,6)}{1,3} \cdot \frac{(0,1-0,0)}{1,5} \cdot \frac{(1,0-0,2)}{1,6} \cdot \frac{(0,8-0,7)}{1,1} = 0,389 \cdot 10^{-3};$$

$$P_3^I = \prod_{j=1}^5 p_{3j} = \frac{(0,5-0,3)}{1,2} \cdot \frac{(0,6-0,4)}{1,3} \cdot \frac{(0,7-0,2)}{1,5} \cdot \frac{(0,4-0,2)}{1,6} \cdot \frac{(0,8-0,7)}{1,1} = 1,194 \cdot 10^{-3};$$

$$H_1^I = -1,194 \cdot 10^{-3} \cdot \log_2(1,194 \cdot 10^{-3}) - (1 - 1,194 \cdot 10^{-3}) \log_2(1 - 1,194 \cdot 10^{-3}) = 2,675 \cdot 10^{-3};$$

$$H_2^I = -0,389 \cdot 10^{-3} \cdot \log_2(0,389 \cdot 10^{-3}) - (1 - 0,389 \cdot 10^{-3}) \log_2(1 - 0,389 \cdot 10^{-3}) = 0,625 \cdot 10^{-3};$$

$$H_3^I = -1,194 \cdot 10^{-3} \cdot \log_2(1,194 \cdot 10^{-3}) - (1 - 1,194 \cdot 10^{-3}) \log_2(1 - 1,194 \cdot 10^{-3}) = 2,675 \cdot 10^{-3};$$

$$H_0^I = \sum_{i=1}^3 H_i^I = 2,675 \cdot 10^{-3} + 0,625 \cdot 10^{-3} + 2,675 \cdot 10^{-3} = 5,976 \cdot 10^{-3}.$$

В ФС R_{23} из множества ДП $\Pi_f = \{\pi_j | j = \overline{1,5}\}$ выполнены проверки π_2 , π_3 и π_5 , поэтому по формуле (6) получим:

$$P_{f1}^I = \prod_{j=2,3,5} p_{1j} = \frac{(0,7-0,5)}{1,3} \cdot \frac{(0,7-0,2)}{1,5} \cdot \frac{(0,4-0,3)}{1,1} = 4,662 \cdot 10^{-3};$$

$$P_{f2}^I = \prod_{j=2,3,5} p_{2j} = \frac{(0,8-0,6)}{1,3} \cdot \frac{(0,1-0,0)}{1,5} \cdot \frac{(0,8-0,7)}{1,1} = 0,932 \cdot 10^{-3};$$

$$P_{f3}^I = \prod_{j=2,3,5} p_{3j} = \frac{(0,6-0,4)}{1,3} \cdot \frac{(0,7-0,2)}{1,5} \cdot \frac{(0,8-0,7)}{1,1} = 4,662 \cdot 10^{-3};$$

$$P_{F1}^I = \prod_{j=1,4} p_{1j} = \frac{(0,5-0,3)}{1,2} \cdot \frac{(0,4-0,0)}{1,6} = 4,167 \cdot 10^{-2};$$

$$P_{F2}^I = \prod_{j=1,4} p_{2j} = \frac{(0,9-0,8)}{1,2} \cdot \frac{(1,0-0,1)}{1,6} = 4,167 \cdot 10^{-2};$$

$$P_{F3}^I = \prod_{j=1,4} p_{3j} = \frac{(0,5-0,3)}{1,2} \cdot \frac{(0,4-0,0)}{1,6} = 4,167 \cdot 10^{-2}.$$

Рассчитаем значение полноты $V_{fR_{23}}^I$ по формуле (14) в ФС R_{23} для множества $\Pi_f = \{\pi_j | j = \overline{1,5}\}$ при значениях интервалов ДП π_2 в варианте I:

$$V_{fR_{23}}^I = 1 - \frac{4,662 \cdot 10^{-3} \cdot \left(-4,167 \cdot 10^{-2} \log_2(4,167 \cdot 10^{-2}) - (1 - 4,167 \cdot 10^{-2}) \log_2(1 - 4,167 \cdot 10^{-2}) \right)}{5,976 \cdot 10^{-3}} -$$

$$\frac{0,932 \cdot 10^{-3} \cdot \left(-4,167 \cdot 10^{-2} \log_2(4,167 \cdot 10^{-2}) - (1 - 4,167 \cdot 10^{-2}) \log_2(1 - 4,167 \cdot 10^{-2}) \right)}{5,976 \cdot 10^{-3}} -$$

$$\frac{4,662 \cdot 10^{-3} \cdot \left(-4,167 \cdot 10^{-2} \log_2(4,167 \cdot 10^{-2}) - (1 - 4,167 \cdot 10^{-2}) \log_2(1 - 4,167 \cdot 10^{-2}) \right)}{5,976 \cdot 10^{-3}} = 0,571.$$

Проведем аналогичные расчеты:

– для полноты $V_{fR_{23}}^II$ для множества $\Pi_f = \{\pi_j | j = \overline{1,5}\}$ при значениях интервалов

ДП π_2 в варианте II:

$$P_1^{II} = \prod_{j=1}^5 p_{1j} = 1,148 \cdot 10^{-4}; P_2^{II} = \prod_{j=1}^5 p_{2j} = 0,230 \cdot 10^{-4}; P_3^{II} = \prod_{j=1}^5 p_{3j} = 1,148 \cdot 10^{-4};$$

$$H_1^{II} = 1,668 \cdot 10^{-3}; H_2^{II} = 0,387 \cdot 10^{-3}; H_3^{II} = 1,668 \cdot 10^{-3}; H_0^{II} = 3,723 \cdot 10^{-3};$$

$$P_{f1}^{II} = \prod_{j=2,3,5} p_{1j} = 2,755 \cdot 10^{-3}; P_{f2}^{II} = \prod_{j=2,3,5} p_{2j} = 0,551 \cdot 10^{-3}; P_{f3}^{II} = \prod_{j=2,3,5} p_{3j} = 2,755 \cdot 10^{-3};$$

$$P_{F1}^{II} = \prod_{j=1,4} p_{1j} = 4,167 \cdot 10^{-2}; P_{F2}^{II} = \prod_{j=1,4} p_{2j} = 4,167 \cdot 10^{-2}; P_{F3}^{II} = \prod_{j=1,4} p_{3j} = 4,167 \cdot 10^{-2};$$

$$V_{fR_{23}}^{II} = 1 - \frac{2,755 \cdot 10^{-3} \cdot \left(-4,167 \cdot 10^{-2} \log_2(4,167 \cdot 10^{-2}) - (1 - 4,167 \cdot 10^{-2}) \log_2(1 - 4,167 \cdot 10^{-2}) \right)}{3,723 \cdot 10^{-3}} -$$

$$\frac{0,551 \cdot 10^{-3} \cdot \left(-4,167 \cdot 10^{-2} \log_2(4,167 \cdot 10^{-2}) - (1 - 4,167 \cdot 10^{-2}) \log_2(1 - 4,167 \cdot 10^{-2}) \right)}{3,723 \cdot 10^{-3}} -$$

$$\frac{2,755 \cdot 10^{-3} \cdot \left(-4,167 \cdot 10^{-2} \log_2(4,167 \cdot 10^{-2}) - (1 - 4,167 \cdot 10^{-2}) \log_2(1 - 4,167 \cdot 10^{-2}) \right)}{3,723 \cdot 10^{-3}} = 0,593.$$

– для полноты $V_{R_{23}}^I$ для множества $\Pi = \{\pi_j | j = \overline{1,7}\}$ при значениях интервалов ДП π_2 в варианте I:

$$P_1^I = \prod_{j=1}^7 p_{1j} = 1,195 \cdot 10^{-5}; P_2^I = \prod_{j=1}^7 p_{2j} = 0,120 \cdot 10^{-5}; P_3^I = \prod_{j=1}^7 p_{3j} = 0,598 \cdot 10^{-5};$$

$$H_1^I = 2,127 \cdot 10^{-4}; H_2^I = 0,252 \cdot 10^{-4}; H_3^I = 1,124 \cdot 10^{-4}; H_0^I = 3,503 \cdot 10^{-4};$$

$$P_{f1}^I = \prod_{j=2,3,5,6,7} p_{1j} = 2,869 \cdot 10^{-4}; P_{f2}^I = \prod_{j=2,3,5,6,7} p_{2j} = 0,287 \cdot 10^{-4}; P_{f3}^I = \prod_{j=2,3,5,6,7} p_{3j} = 1,143 \cdot 10^{-4};$$

$$P_{F1}^I = \prod_{j=1,4} p_{1j} = 4,167 \cdot 10^{-2}; P_{F2}^I = \prod_{j=1,4} p_{2j} = 4,167 \cdot 10^{-2}; P_{F3}^I = \prod_{j=1,4} p_{3j} = 4,167 \cdot 10^{-2};$$

$$V_{R_{23}}^I = 1 - \frac{2,869 \cdot 10^{-4} \cdot \left(-4,167 \cdot 10^{-2} \log_2(4,167 \cdot 10^{-2}) - (1 - 4,167 \cdot 10^{-2}) \log_2(1 - 4,167 \cdot 10^{-2}) \right)}{3,503 \cdot 10^{-4}} -$$

$$\frac{0,287 \cdot 10^{-4} \cdot \left(-4,167 \cdot 10^{-2} \log_2(4,167 \cdot 10^{-2}) - (1 - 4,167 \cdot 10^{-2}) \log_2(1 - 4,167 \cdot 10^{-2}) \right)}{3,503 \cdot 10^{-4}} -$$

$$\frac{1,143 \cdot 10^{-4} \cdot \left(-4,167 \cdot 10^{-2} \log_2(4,167 \cdot 10^{-2}) - (1 - 4,167 \cdot 10^{-2}) \log_2(1 - 4,167 \cdot 10^{-2}) \right)}{3,503 \cdot 10^{-4}} = 0,673.$$

– для полноты $V_{R_{23}}^{\text{II}}$ для множеств $\Pi = \{\pi_j | j = \overline{1,7}\}$ при значениях интервалов ДП π_2 в варианте II:

$$\begin{aligned}
 P_1^{\text{II}} &= \prod_{j=1}^7 p_{1j} = 7,064 \cdot 10^{-6}; P_2^{\text{II}} = \prod_{j=1}^7 p_{2j} = 0,706 \cdot 10^{-6}; P_3^{\text{II}} = \prod_{j=1}^7 p_{3j} = 3,532 \cdot 10^{-5}; \\
 H_1^{\text{II}} &= 1,311 \cdot 10^{-4}; H_2^{\text{II}} = 0,155 \cdot 10^{-4}; H_3^{\text{II}} = 0,691 \cdot 10^{-4}; H_0^{\text{II}} = 2,156 \cdot 10^{-4}; \\
 P_{f1}^{\text{II}} &= \prod_{j=2,3,5,6,7} p_{1j} = 2,869 \cdot 10^{-4}; P_{f2}^{\text{II}} = \prod_{j=2,3,5,6,7} p_{2j} = 0,287 \cdot 10^{-4}; P_{f3}^{\text{II}} = \prod_{j=2,3,5,6,7} p_{3j} = 1,143 \cdot 10^{-3}; \\
 P_{F1}^{\text{II}} &= \prod_{j=1,4} p_{1j} = 4,167 \cdot 10^{-2}; P_{F2}^{\text{II}} = \prod_{j=1,4} p_{2j} = 4,167 \cdot 10^{-2}; P_{F3}^{\text{II}} = \prod_{j=1,4} p_{3j} = 4,167 \cdot 10^{-2}; \\
 V_{R_{23}}^{\text{II}} &= 1 - \frac{2,869 \cdot 10^{-4} \cdot (-4,167 \cdot 10^{-2} \log_2(4,167 \cdot 10^{-2}) - (1 - 4,167 \cdot 10^{-2}) \log_2(1 - 4,167 \cdot 10^{-2}))}{2,156 \cdot 10^{-4}} \\
 &\quad - \frac{0,287 \cdot 10^{-4} \cdot (-4,167 \cdot 10^{-2} \log_2(4,167 \cdot 10^{-2}) - (1 - 4,167 \cdot 10^{-2}) \log_2(1 - 4,167 \cdot 10^{-2}))}{2,156 \cdot 10^{-4}} \\
 &\quad - \frac{1,143 \cdot 10^{-3} \cdot (-4,167 \cdot 10^{-2} \log_2(4,167 \cdot 10^{-2}) - (1 - 4,167 \cdot 10^{-2}) \log_2(1 - 4,167 \cdot 10^{-2}))}{2,156 \cdot 10^{-4}} = 0,735.
 \end{aligned}$$

Из приведенных расчетов следует, что в каждом ФС соответствующие вероятности P_{Fi} равны: $P_{fFi}^{\text{I}} = P_{fFi}^{\text{II}} = P_{Fi}^{\text{I}} = P_{Fi}^{\text{II}}$. Уменьшение интервалов $\Delta_{i2}; i = \overline{1,3}$ за счет снижения погрешности оценивания ДП π_2 , как и введение дополнительных доступных для оценивания ДП π_6 и π_7 , приводит к увеличению исходной энтропии $H_{f0}^{\text{I}} < H_{f0}^{\text{II}} < H_0^{\text{I}} < H_0^{\text{II}}$ и уменьшению вероятностей P_{fi}^{I} и P_{fi}^{II} , что влечет за собой уменьшение числителя и увеличение знаменателя вычитаемой дроби в формуле (15), в результате чего увеличивается значение показателя полноты: $V_{fR_k}^{\text{I}} < V_{fR_k}^{\text{II}} < V_{R_k}^{\text{I}} < V_{R_k}^{\text{II}}$. Результаты оценивания полноты информации во всех ФС, в которых принимается решение о ТС только одного вида из множества $S = \{S_i | i = \overline{1,3}\}$ с учетом двух множеств ДП, приведены в табл. 2.

В табл. 2 каждому ФС (столбец 2) соответствует две программы распознавания: столбец 3 – для множества ДП $\Pi_f = \{\pi_j | j = \overline{1,5}\}$ и столбец 5 – для множества ДП $\Pi = \{\pi_j | j = \overline{1,7}\}$, где π_6 и π_7 – новые ДП, не входящие в состав множества Π . Для каждой программы рассчитано значение показателя полноты V распознавания: столбец 4 – для множества доступных ДП Π_f и столбец 6 – для множества доступных ДП Π . При этом в ФС $R_{12}, R_{18}, R_{23}, R_{24}, R_{27}, R_{28}, R_{30}$ и R_{31} , в которых доступным является ДП π_2 , рассчитаны значения полноты для исходного интервала Δ_{i2}^{I} ДП π_2 – строка I и для интервала Δ_{i2}^{II} – II, полученного в результате снижения погрешности σ_{i2} определения оценки y_2 ДП π_2 .

Для итогового оценивания выигрыша в полноте рассчитаем среднюю полноту для множеств Π_f и Π в вариантах I и II как среднее дискретной случайной величины по формуле

$$\bar{V} = \sum_{v=1}^{15} V_v \cdot P_v, \quad (15)$$

где V_v – полнота результата в v -м ФС (столбцы 4 или 6);

P_v – вероятность того, что решение, принятое в ФС R_k , является достоверным.

Таблица 2

Результаты вычисления полноты распознавания ТС для множеств Π_f и Π

№	ФС	Доступные ДП Π_f	Полнота V	Доступные ДП $\Pi = \{\Pi_f, \pi_6, \pi_7\}$	Полнота V		
1	2	3	4	5	6		
1	R ₉	π_1, π_5	0,439	$\pi_1, \pi_5, \pi_6, \pi_7$	0,574		
2	R ₁₂	π_2, π_5	I	0,441	$\pi_2, \pi_5, \pi_6, \pi_7$	I	0,577
			II	0,470		II	0,594
3	R ₁₄	π_3, π_5	0,376	$\pi_3, \pi_5, \pi_6, \pi_7$	0,524		
4	R ₁₅	π_4, π_5	0,384	$\pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7$	0,535		
5	R ₁₈	π_1, π_2, π_5	I	0,636	$\pi_1, \pi_2, \pi_5, \pi_6, \pi_7$	I	0,724
			II	0,655		II	0,735
6	R ₂₀	π_1, π_3, π_5	0,569	$\pi_1, \pi_3, \pi_5, \pi_6, \pi_7$	0,670		
7	R ₂₁	π_1, π_4, π_5	0,578	$\pi_1, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7$	0,681		
8	R ₂₃	π_2, π_3, π_5	I	0,571	$\pi_2, \pi_3, \pi_5, \pi_6, \pi_7$	I	0,673
			II	0,593		II	0,686
9	R ₂₄	π_2, π_4, π_5	I	0,580	$\pi_2, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7$	I	0,684
			II	0,601		II	0,697
10	R ₂₅	π_3, π_4, π_5	0,514	$\pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7$	0,630		
11	R ₂₇	$\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_5$	I	0,776	$\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_5, \pi_6, \pi_7$	I	0,827
			II	0,788		II	0,834
12	R ₂₈	$\pi_1, \pi_2, \pi_4, \pi_5$	I	0,786	$\pi_1, \pi_2, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7$	I	0,841
			II	0,797		II	0,847
13	R ₂₉	$\pi_1, \pi_3, \pi_4, \pi_5$	0,712	$\pi_1, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7$	0,780		
14	R ₃₀	$\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5$	I	0,714	$\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7$	I	0,783
			II	0,729		II	0,792
15	R ₃₁	$\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5$	I	1,000	$\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7$	I	1,000
			II	1,000		II	1,000

В каждом ФС R_k принятие решения о виде ТС происходит на основе ограниченного множества доступных ДП, поэтому остается вероятность ошибки, поскольку недоступные ДП могут не соответствовать известному виду ТС. Вероятность P_v равна вероятности соответствия не оцененных ДП известному виду ТС:

$$P_v = \frac{\sum_{i=1}^m P_{Fi}}{m}. \quad (16)$$

Рассчитанные значения средней полноты \bar{V} приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты вычисления средней полноты распознавания ТС по множеству ДП Π_f и Π

Множество ДП	Погрешность вычисления ДП	\bar{V}
Π_f	I	0,587
	II	0,605
$\Pi = \{\Pi_f, \pi_6, \pi_7\}$	I	0,702
	II	0,713

Анализ табл. 3 позволяет сделать вывод о том, что введение двух дополнительных ДП повысило полноту оценивания ДП, на основе которых принимается решение о виде ТС, при-

мерно на 11%, а вместе с тем и уменьшение погрешности оценивания ДП π_2 позволило дополнительно получить выигрыш еще приблизительно на 1,5%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная методика позволяет решать задачу диагностирования ТС при отсутствии непосредственного доступа к объекту и условиям его применения (испытания) по ограниченному вектору измерительной информации. Кроме того, методика позволяет количественно оценить полноту информации, которую возможно получить при использовании доступного объема результатов измерений ДП.

Особенность методики заключается в расширении множества возможных решений о виде ТС. Классическая задача контроля и диагностирования технических систем [1–3] требует полной определенности возможных видов ТС рассматриваемой системы. Расширение осуществляется за счет ввода и учета при распознавании нового вида ТС контролируемой системы, измеренные значения ДП которой не согласуются с аналогичными значениями ДП ранее наблюдаемых ТС.

Дополнительной особенностью методики является предложение формул для количественного оценивания полноты информации, на основании которой принимается решение о виде ТС. Это позволяет обоснованно говорить о целесообразности проведения дополнительных работ по расширению множества признаков распознавания – ДП. Определены способы повышения показателя полноты.

Результаты данной работы могут быть полезны при разработке и реализации программно-алгоритмического обеспечения, предназначенного для распознавания вида ТС КО, например КО иностранных государств.

Список используемых источников

1. *Дмитриев А. К., Юсупов Р. М.* Идентификация и техническая диагностика : учебник для вузов. – Л. : МО СССР, 1987. – 521 с.
2. *Дмитриев А. К., Копкин Е. В.* Построение информационно-поисковой системы по критерию максимума полезности получаемой информации // *Авиакосмическое приборостроение.* – 2003. – № 6. – С. 46–51.
3. *Копкин Е. В., Кобзарев И. М.* Вычисление ценности диагностической информации в сетевых дискретных структурах анализа технического состояния космических средств // *Системы управления, связи и безопасности.* – 2018. – № 2. – С. 40–55.
4. *Шмелёв В. В., Копкин Е. В., Попов Д. В.* Методика диагностирования сложного технического объекта на основе учета ценности измерительной информации // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки.* – 2019. – № 10. – С. 211–224.
5. *Шмелёв В. В., Павлов Д. А., Зайцев Д. О.* Методика оценивания полноты автоматизированного контроля технического состояния ракет-носителей «Союз-2» // *Авиакосмическое приборостроение.* – 2020. – № 8. – С. 28–36.

Ю. А. Важенин,
кандидат педагогических наук;
Д. А. Новиков,
кандидат педагогических наук;
Д. В. Чернов,
кандидат педагогических наук, доцент

МОДЕЛЬ ОРГАНИЗАЦИИ ФИЗИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ОБУЧАЮЩИХСЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ ВОЗДУШНО-КОСМИЧЕСКИХ СИЛ В ХОДЕ ПРАКТИК

В статье приведены результаты предварительных исследований по вопросу необходимости физической подготовки обучающихся образовательной организации высшего образования в ходе стажировок и практик. Представлена экспериментальная модель организации самостоятельной физической тренировки, включающая блок мониторинга, содержательный блок, управленческий и результативный блоки. Предложенная модель реализована в программе для ЭВМ и позволяет учитывать при построении тренировочного процесса ряд ключевых показателей: исходный уровень физической подготовленности и развития физических качеств, показатели функционального состояния обучающихся.

Ключевые слова: войсковая стажировка, практика, индивидуальное задание, физическая подготовка.

ВВЕДЕНИЕ

В сложившихся геополитических и социально-экономических условиях содержание повседневной деятельности офицерских кадров постоянно усложняется. Офицерам все чаще приходится действовать в нестандартных ситуациях, решать сложные и ответственные профессиональные задачи. Данные обстоятельства требуют особого внимания к проблемам профессиональной подготовки будущих офицеров в военной образовательной организации высшего образования Министерства обороны Российской Федерации.

Знания, навыки и умения, полученные в ходе обучения, закрепляются в ходе практик [1]. Практики организуются по отдельным дисциплинам или группам дисциплин, а также по видам служебной деятельности в целях закрепления знаний и приобретения практических навыков с учетом должностного предназначения обучающихся. Виды и типы практик, а также их продолжительность определяются образовательной организацией с учетом федеральных государственных образовательных стандартов и квалификационных требований [2].

Большинством авторов научных исследований отмечается важность практик в формировании профессиональных компетенций обучающихся [5–9]. В то же время должного внимания физической подготовке для качественного освоения обучающимися программ практик в научных исследованиях не уделялось [12].

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В соответствии с ФГОС высшего образования на практики и стажировки выделяется от 27 до 45 зачетных единиц, что составляет 9,9–15% объема программы подготовки специалистов.

Количество практик и их содержание зависят от специальности (специализации), к которой готовится обучающийся. Количество практик варьируется от 2 до 8. По месту проведе-

ния они делятся на проводимые в пунктах постоянной дислокации, воинских частях, образовательных организациях.

Анализ продолжительности и распределения бюджета времени, отведенного на практики обучающихся, проведен на примере образовательной организации высшего образования Министерства обороны инженерного профиля (рис. 1.).

Учебные подпазвеления	КУРСЫ	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май
		Среднее профессиональное образование								
СПО	1 курс									
	2 курс									
	3 курс									
Высшее образование-специалитет										
ВО	1 курс									
	2 курс									
	3 курс									
	4 курс									
	5 курс									

Рис. 1. Распределение бюджета времени на стажировки и практики обучающихся по программам среднего профессионального и высшего образования (вариант)

Анализ сроков проведения и продолжительности практик и стажировок позволяет сделать ряд выводов:

- большая часть стажировок и практик приходится на завершающий этап обучения (3-й год обучения – для СПО; 4-й, 5-й – для ВО), который характеризуется проживанием вне казармы, отсутствием утренней физической зарядки как элемента распорядка дня и, что важно, усложнением нормативных требований к уровню физической подготовленности. Это приводит, как правило, к снижению достигнутых оценочных показателей обучающихся и росту количества обучающихся с избыточным весом;

- большая часть практик организуется с убытием обучающихся в воинские части и образовательные организации, что связано со сменой обстановки, адаптацией к новым условиям быта и служебной деятельности;

- к моменту проведения практик предполагается высокая степень формирования (в ходе изучения учебной дисциплины «Физическая подготовка») потребности в самостоятельных систематических занятиях физическими упражнениями;

- увеличивается сложность программ практик и стажировок в зависимости от сроков окончания обучения, а также выполнения в ходе практик заданий по подготовке выпускных квалификационных работ [4];

- продолжительность практик составляет от двух до шести недель, что в совокупности с небольшим бюджетом времени, отведенным на занятия по учебной дисциплине «Физическая подготовка» в 10-м семестре, и проведением после заключительной практики на 5-м году обучения государственного экзамена по «Физической подготовке» свидетельствует о необходимости организации физической подготовки в период практики.

Физическая подготовка в военно-учебном заведении, являясь одновременно учебной дисциплиной и элементом распорядка дня, представляет собой управляемый систематизированный процесс, направленный на развитие физических качеств, формирование военно-прикладных двигательных навыков военнослужащих с учетом их военно-профессиональной деятельности, пола и возраста [2].

Прямого указания на организацию физической подготовки в период практики в руководящих документах не выявлено. В то же время одна из задач кафедры физической подготовки заключается в выдаче курсантам заданий на войсковые стажировки и практики [3].

На основании проведенных исследований нами предложена модель организации физической подготовки в период практики (рис. 2).

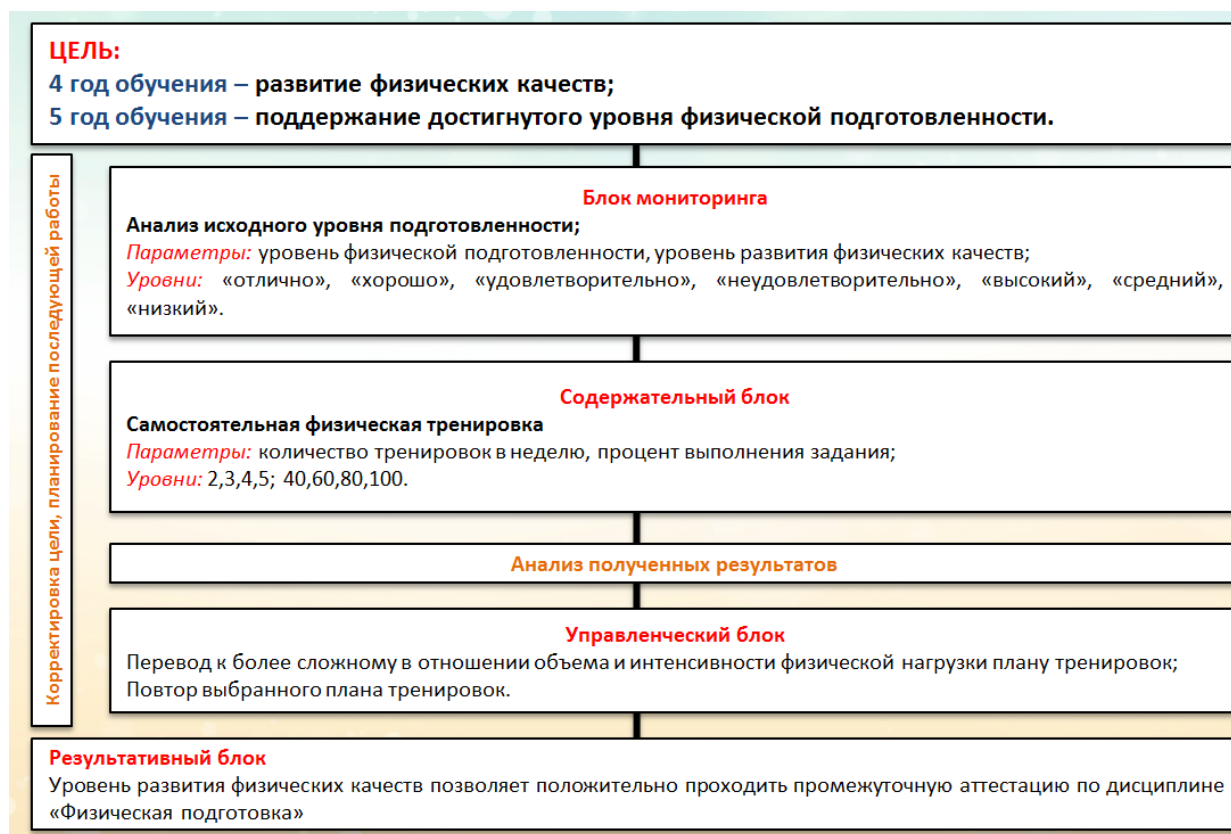


Рис. 2. Модель организации физической подготовки в период практики

Блок мониторинга (рис. 3) направлен на изучение исходных данных обучающегося в процессе педагогической деятельности. Такими данными являются:

- год обучения,
- уровень физического развития и функционального состояния,
- уровень физической подготовленности,
- уровень развития физических качеств,
- количество возможных занятий в неделю.

Все рассматриваемые показатели оцениваются согласно классическим методикам.

Блок мониторинга																
Год обучения	2				3				4				5			
Индекс массы тела																
Условных единиц	18 - 24,9	25 - 30	30 - 35	>35	18 - 24,9	25 - 30	30 - 35	>35	18 - 24,9	25 - 30	30 - 35	>35	18 - 24,9	25 - 30	30 - 35	>35
Уровень физической подготовленности																
Балл	350	310	250	<250	360	320	260	<260	360	320	260	<260	360	320	260	<260
Уровень развития физических качеств																
Балл	70	65	55	<55	75	70	65	<65	75	70	65	<65	75	70	65	<65
Уровень физического состояния																
Условных единиц	0,82	0,67	0,52	0,37	0,82	0,67	0,52	0,37	0,82	0,67	0,52	0,37	0,82	0,67	0,52	0,37
Количество тренировок в неделю																
Раз	5	4	3	2	5	4	3	2	5	4	3	2	5	4	3	2

Рис. 3. Содержание блока мониторинга модели организации самостоятельной физической тренировки

Полученные данные являются отправной точкой для планирования тренировочного процесса, направленного на развитие слабейших физических качеств, они позволяют оперативно и своевременно прогнозировать изменения в подготовленности обучающихся и подбирать адекватные физические упражнения и параметры физической нагрузки, изучать и учитывать динамику развития физических качеств и показателей функционального состояния обучающихся.

Содержательный блок предполагает организацию самостоятельной физической тренировки в период практики по планам, разработанным на основе исходных данных. Планы разрабатываются на неделю. Средства, методы физической тренировки и способы повышения физической нагрузки подбираются с учетом общих подходов и закономерностей развития физических качеств [4]. В зависимости от менее развитого качества составляется общая направленность отдельных тренировок, устанавливаются сроки контрольных срезов и т. д.

Содержательный блок																
Параметры:																
Количество тренировок в неделю – 4																
Год обучения – 3																
Уровень физической подготовленности – 3																
Уровень развития физических качеств: сила 4, быстрота 3, выносливость 3.																
Уровень физического состояния – удовлетворительный.																
Неделя	1				2				3				4			
Индекс массы тела																
Направленность	в	с	б	в	с	б	в	в	с	б	с	в	с	б	б	в
Методы	Равномерный, повторный				Равномерный, повторный				Равномерный, повторный интервальный				Равномерный, повторный интервальный			
Способы повышения нагрузки	непрерывный				ступенчатый				непрерывный				волнообразный			

Рис. 4. Содержательный блок модели организации самостоятельной физической тренировки

Управленческий блок предполагает регулирование перехода к следующему уровню тренировок, повтор или коррекцию текущего плана тренировок на основе мониторинга выполнения текущего плана тренировок. При этом учитывается выполнение задания (в процентах максимально возможного).

Управленческий блок			
Переход к более сложному в отношении объема и интенсивности физической нагрузки плану тренировок;			
Повтор выбранного плана тренировок.			
Результат выполнения задания, % от заданного	100-70	70-30	до 30
Решение	Переход на следующий уровень тренировок	Повтор текущего плана	Корректировка текущего плана

Рис. 5. Содержание управленческого блока модели организации самостоятельной физической тренировки

Результативный блок включает повтор выполнения исследований блока мониторинга с сопоставлением и анализом полученных результатов на различных этапах, а также статистическую обработку полученных данных. Кроме того, он позволит сопоставить заданную цель с полученным результатом и сделать вывод об эффективности модели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании вышеизложенного можно констатировать, что физическая подготовка в ходе стажировок и практик должна носить развивающий и поддерживающий характер и осуществляться в виде самостоятельной физической тренировки.

Содержание физической подготовки должно учитывать:

1. Индивидуальные особенности обучающихся – уровень физической подготовленности, уровень развития физических качеств, количество возможных занятий в неделю, уровень функционального состояния.

2. Особенности места проведения практики – наличие учебно-материальной базы по физической подготовке, климатические и географические условия.

3. Особенности практики – место в образовательной программе, время года проведения, сложность программы.

Реализация данной модели заключается в разработке индивидуальных заданий для курсантов, убывающих на практики и стажировки, образовательных организаций Воздушно-космических сил.

Список используемых источников

1. Об образовании в Российской Федерации (ред. от 17.02.2023) : фед. закон от 29.12.2012 № 273-ФЗ // КонсультантПлюс : справочно-правовая система. – URL: <https://www.consultant.ru/document> (дата обращения: 20.03.2023).

2. Об утверждении Наставления по физической подготовке в Вооруженных Силах Российской Федерации : приказ Министра обороны Российской Федерации от 20 апреля 2023 № 230 // Официальный портал правовой информации России. – URL: <https://pravo.gov.ru> (дата обращения: 20.03.2023).

3. Об организации образовательной деятельности в федеральных государственных организациях, осуществляющих образовательную деятельность и находящихся в ведении Министерства обороны Российской Федерации : приказ Министра обороны РФ от 30.05.2022 № 308 // Официальный портал правовой информации России. – URL: <https://pravo.gov.ru> (дата обращения: 20.03.2023).

4. *Курамшин Ю. Ф.* Теория и методика физической культуры : учебник для студентов высших учебных заведений. – 4-е изд., стер. – М., 2010. – 463 с.

5. *Месенина Е. Л., Ванин В. Н.* Педагогические условия организации самостоятельной работы курсантов в процессе войсковой стажировки // Вестник ТГПУ. – 2018. – № 7. – С. 156–157.

6. *Черняйков М. Н.* Роль и место войсковой стажировки в системе профессиональной подготовки курсантов в образовательных учреждениях Воздушно-космических сил // Мир образования – образование в мире. – 2016. – № 1 (61). – С. 265–268.

7. *Марков А. В., Костин К. К.* О новых подходах к войсковой стажировке курсантов // Модернизация образования : научные достижения, отечественный и зарубежный опыт : материалы 15 Рязанских педагогических чтений. – 2018. – С. 189–194.

8. *Залюбовский А. Ф.* Обеспечение готовности курсантов к войсковой стажировке // Развитие высшего образования : теория и практика : материалы всерос. научно-практич. конф. – Омск, 2022. – С. 47–51.

9. *Гандзюк А. А., Федак Е. И.* Совершенствование процесса формирования военно-профессиональных умений и навыков курсантов в ходе практик и войсковых стажировок // Мир науки, культуры, образования. – 2021. – № 6 (91). – С. 200–202.

10. *Алехин И. А., Гандзюк А. А., Захаренко С. В.* Педагогические аспекты войсковых стажировок и практик как специфических форм обучения курсантов военных вузов // Мир образования – образование в мире. – 2020. – № 2 (78). – С. 210–214.
11. *Павлов С. В., Борисов А. А., Салькова Д. В.* Анализ содержания этапов войсковой стажировки // Актуальные проблемы военно-научных исследований. – 2019. – № 3 (4). – С. 366–379.
12. *Могилевская Т. Е., Гареев Д. Р.* Педагогическая технология формирования прикладных физических качеств обучающихся образовательных организаций высшего образования МЧС России в период стажировки // Ученые записки университета имени П. Ф. Лесгафта. – 2018. – № 12 (166). – С. 162–166.

В. А. Гледенов;
Д. Н. Гула,
кандидат технических наук;
А. Н. Миргородский,
кандидат технических наук

АНАЛИЗ ПОТРЕБЛЕНИЯ ТЕПЛОТЫ В СИСТЕМАХ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА СПЕЦИАЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

В основных требованиях, предъявляемых в нормативных актах по энергоэффективности, установлена необходимость реализации энергосберегающих технологий, в том числе в системах кондиционирования воздуха (СКВ). Одним из главных способов повышения энергоэффективности является снижения потребления теплоты в СКВ.

В статье представлен анализ потребления теплоты подсистемами нагрева воздуха при реализации энерго-сберегающих технологий воздуха.

Ключевые слова: системы кондиционирования воздуха, энергосбережение, энергоэффективность.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из способов реализации требований, указанных в документе [1], является применение в СКВ энергосберегающих режимов обработки воздуха. Такие способы обработки воздуха в СКВ раскрыты в работах [2, 3].

Для реализация энергоэффективных способов обработки воздуха [2, 3] требуется совершенствование алгоритмов управления СКВ, что, в свою очередь, требует подробного анализа работы подсистем СКВ. В частности, особое внимание должно быть уделено подсистеме нагрева воздуха.

Подсистема нагрева воздуха – это обязательная часть любой СКВ, которая потребляет огромное количество тепловой энергии. Существующие алгоритмы управления нагревом воздуха в СКВ не отвечают критериям, предъявляемым к подсистеме нагрева воздуха в работах [3–5]. Налицо противоречие, заключающееся в несоответствии существующих алгоритмов управления нагревом воздуха в СКВ и энергосберегающих режимов обработки воздуха.

ОСОБЕННОСТИ ПОТРЕБЛЕНИЯ ТЕПЛОТЫ СИСТЕМАМИ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

К расчетным зонам с потреблением теплоты относятся 1-я, 2-я, 4-я зоны I и IV классов нагрузок, 4-я зона (только для III класса), зона 1R II и III классов нагрузок.

В расчетной 1-я зоне I класса (рис. 1,а) изменение теплоизбытков на $\Delta q_{\text{п}}$, после изменения расчетной термодинамической схемы (РТС), компенсируется соответствующим изменением производительности подсистемы нагрева 1-й ступени:

$$\Delta q_T = m_{\text{н}} (I_{T_1} - I_{T_1^*}) = \Delta q_{\text{п}}, \quad (1)$$

где $m_{\bar{H}}$ – удельный минимально-неизбежный расход наружного воздуха, кг/(с·м²);
 Δq_T – потребление теплоты, кВт/м²;
 $I_{T_1}, I_{T_1^*}$ – энтальпия воздуха, кДж/кг.

Увеличение теплоизбытков приводит к увеличению расхода приточного воздуха m_{Π} . Поскольку расход наружного воздуха в этой зоне минимален, то компенсировать увеличение приточного расхода приходится за счет увеличения расход воздуха 2-й рециркуляции m_{R2} ($m_{\Pi} = m_{\bar{H}} + m_{R2}$). Данное положение справедливо и при изменении влагоизбытков в обслуживаемом объекте (рис. 2).

В расчетной 1-й зоне IV класса изменения (рис. 1,з) тепловлагоизбытков компенсируются аналогичным образом. Но за счет того, что при этом классе q_{Π} имеют отрицательное значение (в помещении преобладают теплопотери), увеличение теплопотерь компенсируется увеличением производительности подсистемы (1) нагрева 1-й ступени

В расчетной зоне 1R II и III классов нагрузок (рис. 1,б, в) алгоритм расчета подсистем при изменении тепловлагоизбытков более сложен.

Определяющими факторами при расчетах подсистем является положение точки $\bar{\Pi}_a$ и минимально возможное значение температуры воды в камере орошения t_M .

Расход воздуха для 1-й рециркуляции составит

$$m_{R1} = m_{\bar{\Pi}_a} - m_{\bar{H}}, \quad (2)$$

где m_{R1} – расход воздуха 1-й рециркуляции, кг/(с·м²)

С увеличением теплоизбытков (аналогично с уменьшением влагоизбытков) расход воздуха 1-й рециркуляции увеличивается. Это положение справедливо для всех расчетных зон, в которых используется 1-я рециркуляция.

Расход воздуха для 2-й рециркуляции

$$m_{R2} = m_{\Pi_a} - m_{\bar{\Pi}_a} \text{ [кг/(с·м}^2\text{)]}. \quad (3)$$

В первом случае проводится анализ без учета ограничения по температуре t_m . Вместе с тем РТС, при изменении тепло- или влагоизбытков, аналогичны (рис. 2).

На пересечении линий $\varphi = 1$ и вектора тепловлажностного отношения ε_{Π}^* находится точка $\bar{\Pi}_a^*$. Решая уравнения (1)–(3), находим новый расход воздуха, проходящего через кондиционер. По формулам (2) и (3) определяем расходы m_{R1}^* , m_{R2}^* . Изменение расхода воздуха 1-й рециркуляции составит

$$\Delta m_{R1} = m_{R1} - m_{R1}^* \text{ [кг/(с·м}^2\text{)], кг/м}^2\text{]}. \quad (4)$$

Аналогично находим изменение расхода воздуха 2-й рециркуляции.

Изменение производительности подсистемы нагрева 1-й ступени

$$\Delta q_T = m_{\bar{\Pi}_a} (I_{T_{R1}} - I_{T_{R1}^*}) \text{ [кВт/м}^2\text{]}. \quad (5)$$

Во втором случае, учитывая температуру по мокрому термометру t_M , РТС будет значительно отличаться от предыдущей (рис. 3). Расчет расхода приточного воздуха $m_{\bar{\Pi}_a}$ происходит за счет расчета параметров точки пересечения вектора тепловлажностного отношения ε_{Π} и изоэнтальпы $I_{K_{\infty}}$ и решения уравнений (1)–(5). По формулам (2) и (3) определяем расчетные расходы m_{R1} , m_{R2} . Величина, на которую подсистема рециркуляции изменит свои значения расходов воздуха, рассчитываем по формуле (4).

Изменение теплоизбытков на Δq_{II} (рис. 3) должно компенсироваться путем изменения теплопроизводительности подсистемы нагрева 1-й ступени на величину

$$\Delta q_T = m_{\Pi_a} (I_{K_{во}} - I_{C_{R1}}) - m_{\Pi_a^*} (I_{K_{во}} - I_{C_{R1}}) \text{ [кВт/м}^2\text{]}. \quad (6)$$

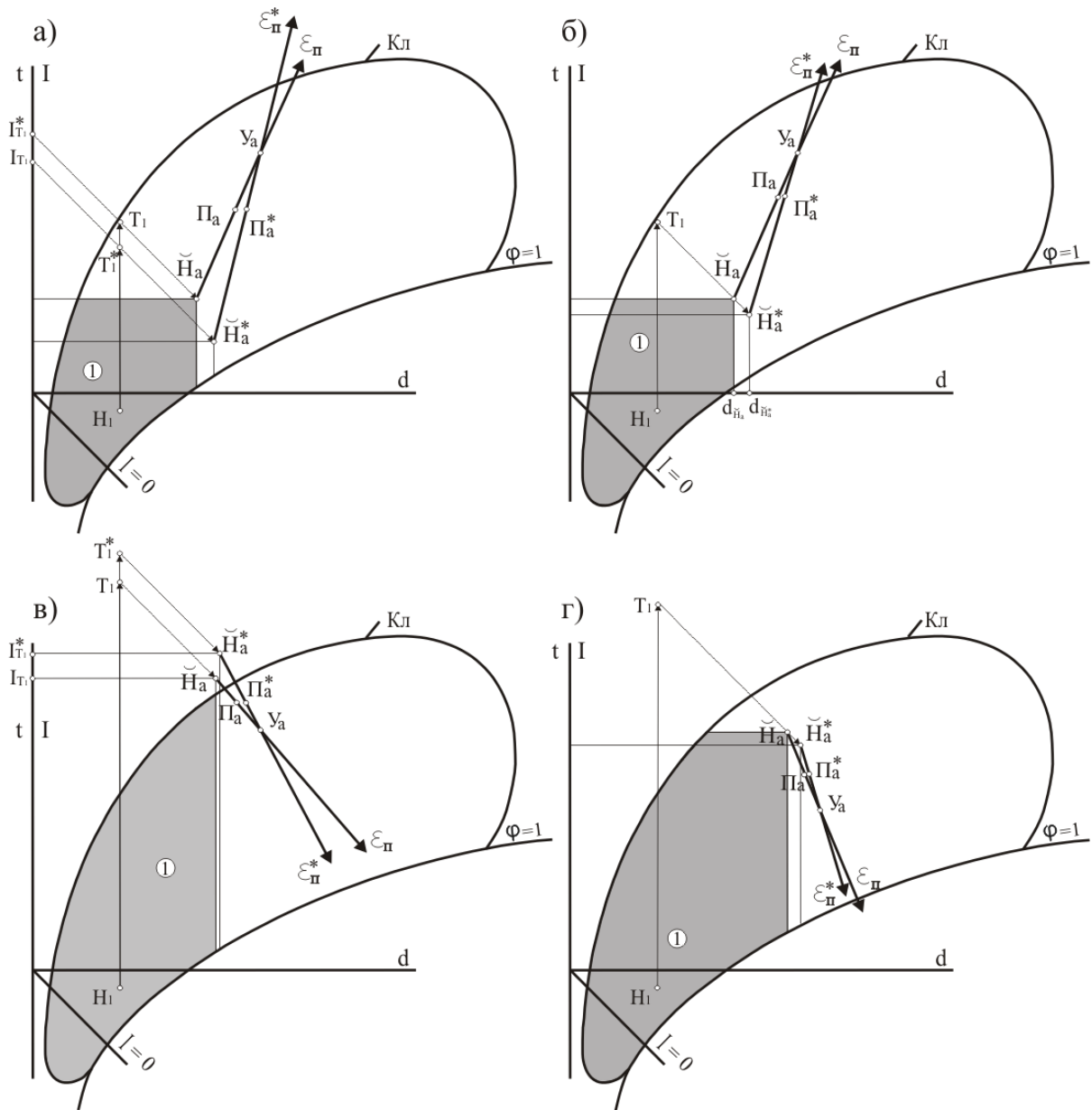


Рис. 1. Изменение положения РТС в 1-й расчетной зоне I и IV классов нагрузок в зависимости от изменения тепловлажоизбытков:
 а – при изменении теплоизбытков для I класса нагрузок,
 б – при изменении теплоизбытков для IV класса нагрузок;
 в – при изменении влажоизбытков для I класса нагрузок;
 г – при изменении влажоизбытков для IV класса нагрузок

Особенностью 2-й расчетной зоны (рис. 4) является отсутствие адиабатного увлажнения, поэтому изменение влагоизбытков на величину Δw_{II} компенсируется путем «скольжения» точки Y_i по линии $Y_a Y_e$ (рис. 4,з) на величину

$$\Delta d_{Y_i} = \Delta w_{II} / m_{\bar{H}} \quad [\text{г/кг}]. \quad (7)$$

При этом будет иметь место изменение производительности подсистемы нагрева воздуха 1-й ступени:

$$\Delta q_T = m_{\bar{H}} (I_{T_1^*} - I_{T_1}) \quad [\text{кВт/м}^2]. \quad (8)$$

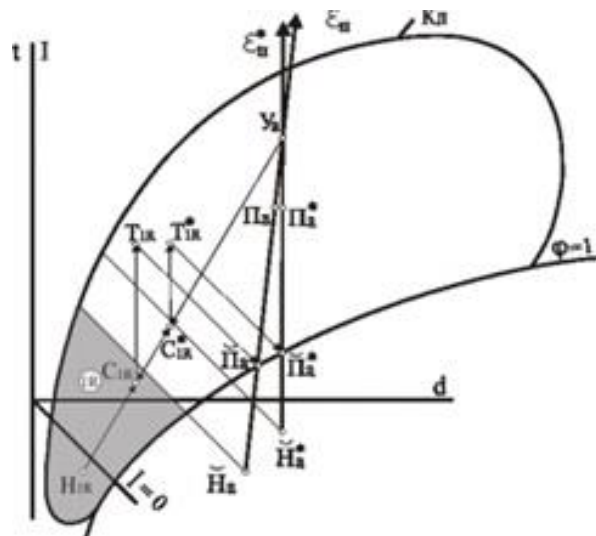


Рис. 2. Изменение PTC в расчетной зоне IR для II и III классов нагрузок

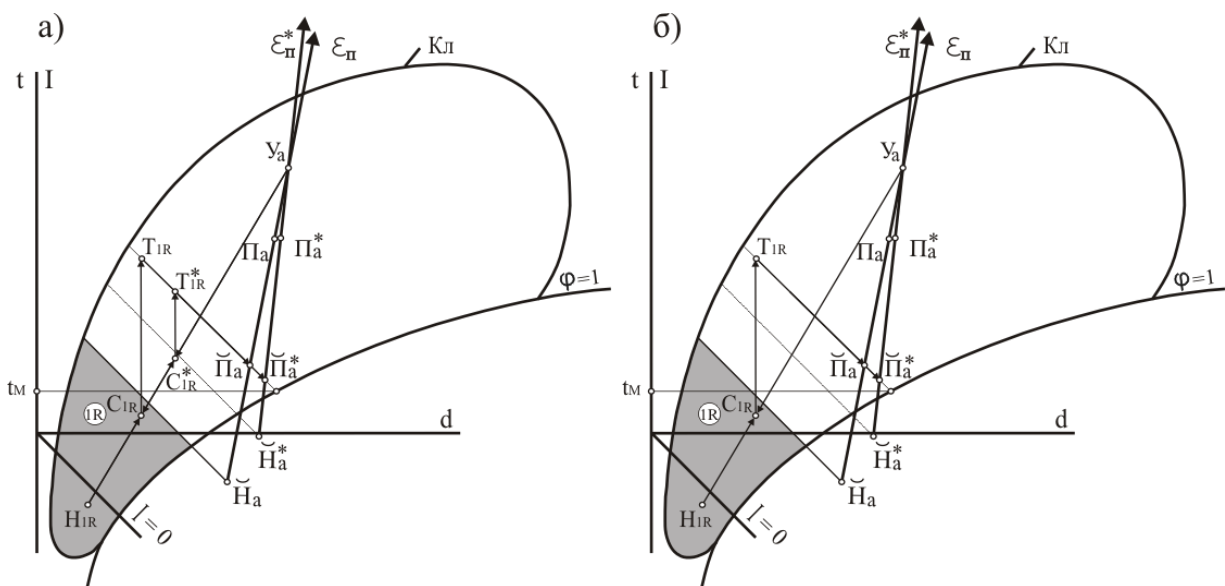


Рис. 3. Изменение PTC в зоне IR для II и III классов нагрузок с учетом температуры t_m : а – при изменении теплоизбытков; б – при изменении влагоизбытков

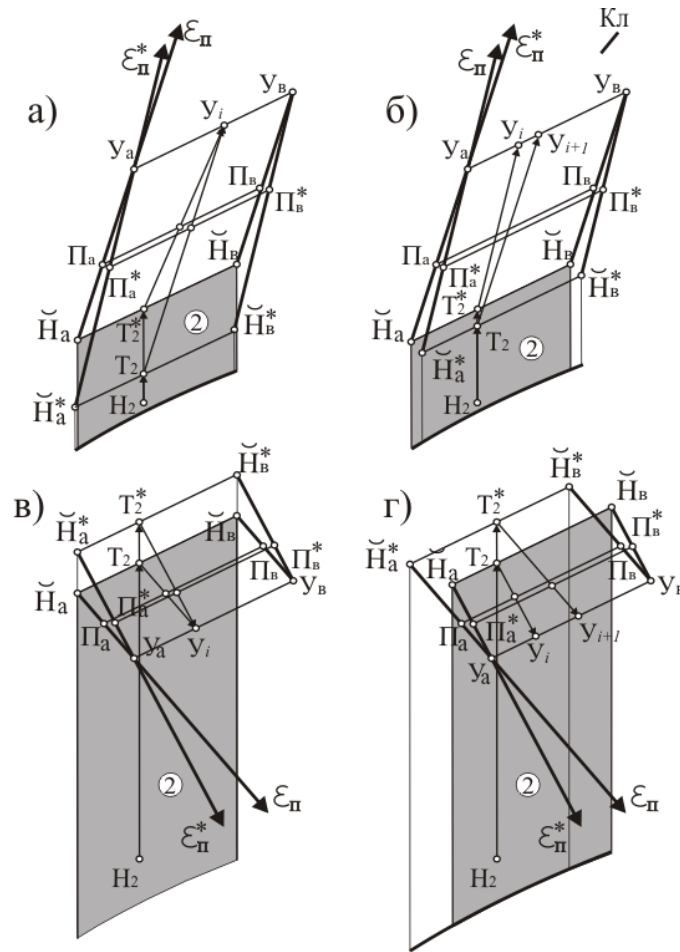


Рис. 4. Изменение положения РТС в 2-й расчетной зоне I и IV классов нагрузок в зависимости от изменения тепло- и влагоизбытков: а – при изменении теплоизбытков для I класса нагрузок, б – при изменении теплоизбытков IV класса нагрузок; в – при изменении влагоизбытков для I класса нагрузок; г – при изменении влагоизбытков для IV класса нагрузок

В 4-й зоне I, II и IV классов нагрузок компенсация изменения теплоизбытков Δq_{II} происходит аналогично расчетной 2-й зоне (рис. 5):

$$\Delta q_{II} = \Delta q_T = m_{\bar{H}} (I_{T_4^*} - I_{T_4}) \text{ [кВт/м}^2\text{]}.$$

Как и для 2-й расчетной зоны, особенностью указанного режима является отсутствие адиабатного увлажнения. Однако изменение влагоизбытков компенсируется изменением расхода наружного воздуха $m_{\bar{H}}$ (рис. 5). На пересечении вектора ϵ_{Π}^* и вектором нагрева воздуха находим точку T_4 . Согласно уравнениям (3)–(5) определяем новый расход наружного воздуха $m_{\bar{H}_2}$, при этом расход воздуха 2-й рециркуляции составит

$$m_{R22} = m_{\Pi} - m_{\bar{H}_2} \text{ [кг/м}^2\text{]}.$$

Изменение производительности подсистемы нагрева 1-й ступени составит

$$\Delta q_T = m_{\bar{H}_1} (I_{T_4} - I_{H_4}) - m_{\bar{H}_2} (I_{T_4^*} - I_{H_4}) \text{ [кВт/м}^2\text{]}. \tag{9}$$

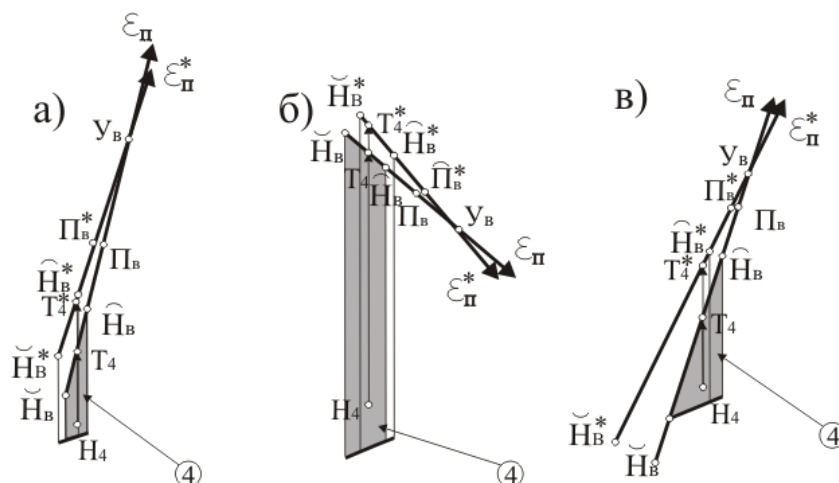


Рис. 5. Изменение РТС в 4-й зоне для I, III, IV классов нагрузок:
 а – для I класса нагрузок; б – для IV класса нагрузок;
 в – для III класса нагрузок

Согласно приведенным в статье расчетам показано, что изменение теплоступлений в обслуживаемом помещении во всех расчетных зонах вызывает изменение расхода приточного воздуха $m_{п}$, что является новым требованием к подсистеме воздухораспределения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе всего вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. В статье проведен анализ работы подсистемы нагрева воздуха СКВ, реализующий энергосберегающие режимы обработки воздуха.
2. Созданы предпосылки для создания алгоритмов управления подсистемой нагрева воздуха, реализация которых может существенно снизить потребление теплоты в СКВ.

Список используемых источников

1. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации : фед. закон от 23.11.2009 г. № 261-ФЗ // КонсультантПлюс : справочно-правовая система. – URL: <https://www.consultant.ru/document> (дата обращения: 1.03.2023).
2. Рымкевич А. А. Системный анализ оптимизации общеобменной вентиляции и кондиционирования воздуха. – СПб. : Арктика, 2003. – 272 с.
3. Коченков Н. В. Энергосберегающие режимы систем кондиционирования воздуха : моногр. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2009. – 399 с.
4. Авсюкевич Д. А., Миргородский А. Н., Ниезова С. Е. Алгоритм решения задачи оптимизации энергопотребления при функционировании систем жизнеобеспечения радиотехнического центра // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 663. – С. 7–13.
5. Снижение эксплуатационных затрат на поддержание требуемого теплового режима методом термозаконономики / Д. А. Авсюкевич [и др.] // Современные направления развития технологии, организации и экономики строительства : сб. тр. участников межвузовск. научно-практич. семинара. – СПб. : ВИ(ИТ) ВА МТО, 2017. – С. 29–32.

Ю. А. Загрутдинов,
кандидат технических наук;
С. А. Мачнев,
кандидат технических наук, доцент;
Е. А. Тюрин,
кандидат технических наук, доцент

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СПОСОБА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОБЩЕВОЙСКОВОГО ЗДАНИЯ

В статье рассмотрен способ проектирования общевоинского здания на базе определения функциональных зон и получения зависимостей по определению общей площади здания. Основой данного метода является систематизация нормативных документов в области проектирования и выработки рациональных зависимостей в определении площадей всех зон и помещений здания с учетом количества проживающих военнослужащих.

Ключевые слова: казарма, площадь помещения, военнослужащие.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящий момент проектирование объектов капитального строительства в Российской Федерации происходит на основании Постановления Правительства РФ от 16.02.2008 № 87 «О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию» [3]. Данное положение устанавливает состав разделов проектной документации и требования к содержанию этих разделов. Всего в состав проектной документации входит 12 разделов. Ключевым или «критически важным» разделом, влияющим на продолжительность проектирования, является раздел 3 «Архитектурные решения». В соответствии с действующими нормами срок проектирования зданий общевоинского назначения достигает 12 месяцев, что является неприемлемым.

В данной работе рассмотрены казармы как здания общевоинского назначения для размещения военнослужащих. Казарменный и жилищный фонды являются основными фондами Министерства обороны для расквартирования военнослужащих. Казарменный фонд может быть как постоянным, так и временным – полевым. Так, в 2019 году специалистами Военно-строительного комплекса Министерства обороны завершены работы по строительству, реконструкции и капитальному ремонту более 3750 зданий и сооружений, что составляет примерно 3,6 млн квадратных метров, из которых казарменный фонд – около 20% от общего фонда капитального строительства Вооруженных сил РФ [1], – это самый большой показатель инвестиций за все время существования современной России. Более масштабно армию обустроивали только в Советском Союзе. Поэтому вопрос сокращения сроков проектирования, ускоренного строительства, ввода объектов военной инфраструктуры в эксплуатацию, а это, в свою очередь, как показывает практика строительства, оказывает влияние на снижение стоимости, является особенно актуальным для Министерства обороны [2].

Так, в соответствии с нормами продолжительности проектирования объектов строительства [4] при строительстве из сборных конструкций срок проектирования при двухстадийном проектировании составляет 3,2 месяца, а при сборно-монолитном строительстве при двухстадийном проектировании – 3,6 месяца [5].

В целях экономии капитальных вложений на строительство казарменно-жилищного фонда и сокращения сроков проектирования авторами предлагается способ оптимизации и оперативного подсчета основных площадей здания казармы на этапе проектирования. Основной

задачей оптимизации является определение площадей всех помещений в отдельности и общей площади здания при заданном числе проживающих в нем военнослужащих.

ПРИМЕР ПРАКТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПРОЦЕССА И ОБЩЕЙ ПЛОЩАДИ ДЛЯ ЗДАНИЯ ОБЩЕВОЙСКОВОГО НАЗНАЧЕНИЯ (КАЗАРМЫ)

Казарма представляет собой здание для проживания курсантов, военнослужащих срочной и контрактной службы. Здание казармы состоит из одной или нескольких секций с обособленным комплексом помещений для размещения роты или равного ей подразделения [6]. К зданиям казарм предъявляются ряд требований по размещению военнослужащих и организации специальных зон, этим они существенно отличаются от зданий гостиниц, общежитий и хостелов. Объемно-планировочное решение казармы организовано путем размещения помещений во внутреннем объеме его основной части с техническим оборудованием, обеспечивающим функциональный процесс. Функциональный процесс казармы состоит из общего построения проживающих, отдыха, проведения занятий по боевой и военно-политической подготовке рядового и сержантского состава, занятия спортом, хранения оружия, боеприпасов, личных вещей, охраны и администрации подразделения, а также осуществления санитарно-гигиенических потребностей.

Таким образом, на основе функционального процесса казармы разработана функциональная схема здания казармы (рис. 1) по требованиям, указанным в документах [6, 7], с целью решения оптимизационной задачи по соотношению оптимальных значений количества проживающих военнослужащих к основным технико-экономическим показателям здания. Функциональная схема – это графическое отображение функциональной взаимосвязи между помещениями, которые предусматриваются в здании

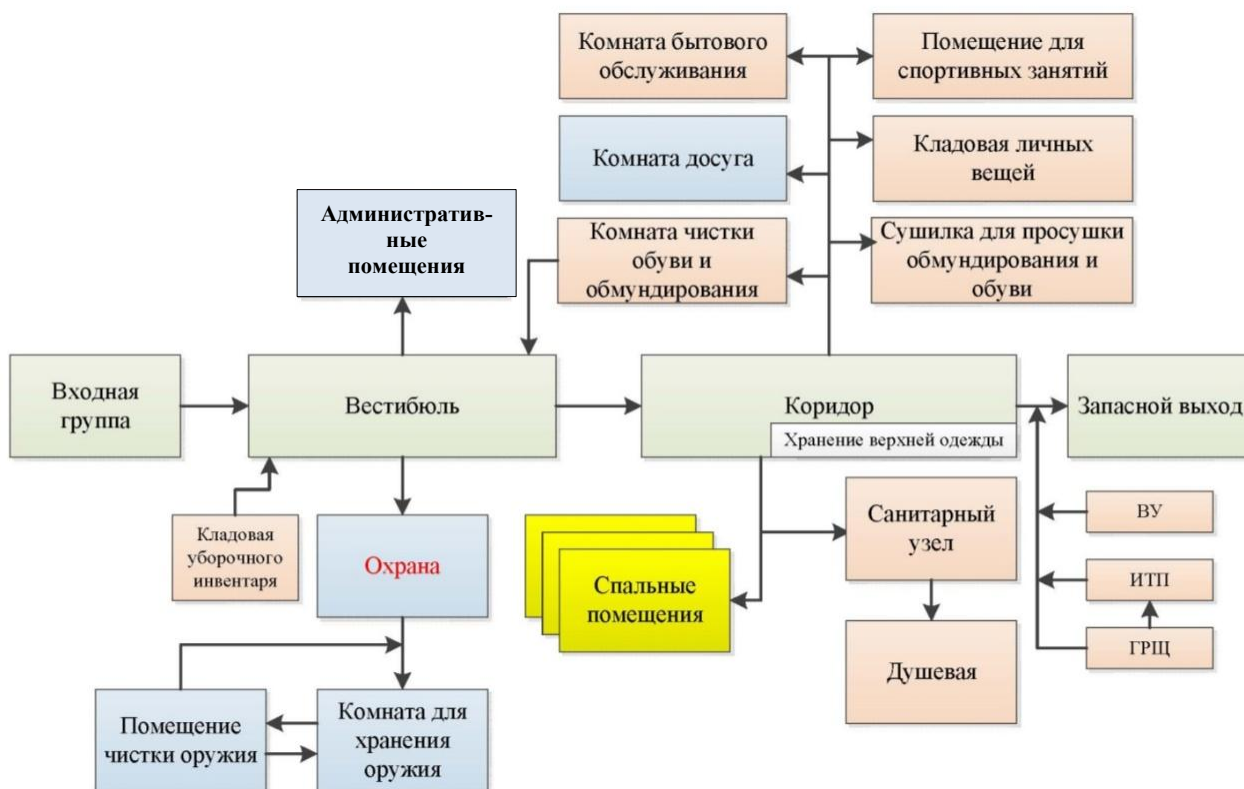


Рис. 1. Функциональная схема здания казармы

Как видно из рассмотрения функциональной схемы, процесс определения площадей (объемно-планировочных параметров) всех помещений казармы является достаточно трудоемким и требует решения оптимизационной задачи на этапе проектирования. В табл. 1 приведены состав и расчетные площади помещений здания казармы, которые необходимо разместить в объеме здания. Площади помещений казармы, не приведенные в документе [6], рассчитываются по [7–9].

Необходимо отметить, что авторами были внесены изменения в табл. 1 ВСН 35-94 «Общевойсковые здания» [6] с учетом вступивших в силу новых нормативных документов и учтены изменения в составе площадей помещений в подсобной и вспомогательной зонах. Данное обстоятельство говорит о том, что существующие ВСН 35-94 морально устарели, их необходимо актуализировать и привести в соответствие с современными требованиями документов федерального уровня.

Таблица 1

Состав и площади помещений казарменной секции для размещения одного подразделения (роты) численностью от 30 до 100 чел.

Наименование помещения	Расчетная ед.	Площадь, м ²	Наименование помещения	Расчетная ед.	Площадь, м ²		
Спальное помещение	1 чел.	4,30*	Комната чистки обуви и обмундирования	Бытовые помещения	1 чел.	0,15	
Комната для канцелярии подразделения (роты)	1 ком.	16–20	Шинельная (коридор-шинельная)		1 чел.	0,1**	
Комната командиров взводов	1 ком.	16–20	Кладовая имущества подразделения (роты) и личных вещей военнослужащих		1 ком.	0,3	
Комната для хранения оружия	1 ком.	0,35	Помещение (место) для спортивных занятий		1 ком.	35	
Помещение (место) для чистки оружия	1 ком.	0,35	Комната бытового обслуживания		1 ком.	0,2	
Комната досуга	1 ком.	0,65	Сушилка для просушки обмундирования и обуви		1 ком.	0,2	
Душевая с преддушевой	Санитарный узел	1 чел.	0,29***	Хоз. помещения	Индивидуальный тепловой пункт	1 ком.	12
Комната для умывания		1 чел.	0,28***		Главный распределительный щит	1 ком.	8
Туалет		1 чел.	0,23***		Водомерный узел	1 ком.	5
Вестибюль, коридор, лестничная клетка	1 чел.	1,3	Кладовая (шкаф) уборочного инвентаря	1 ком.	1,5		

* Площадь определяется исходя из требуемого объема воздуха, равного 12 м³ на 1 чел.

** Применен коэффициент $k_{ш}=0,1$, учитывающий площадь открытого шкафа для хранения верхней одежды на плечиках для одного человека [7].

*** Применены коэффициенты $k_d = 0,08$ для душевой с преддушевой, $k_y = 0,1$ – для комнаты умывания, $k_t = 0,15$ – для туалета, которые учитывают минимальное требуемое количество внутреннего сантехнического оборудования и его расстановку согласно требованиям [10–12] для одного человека.

На основе проведенных исследований [13] объемно-планировочные решения здания казармы образуют следующие зоны: основную, вспомогательную, подсобную и коммуникационную (рис. 2).

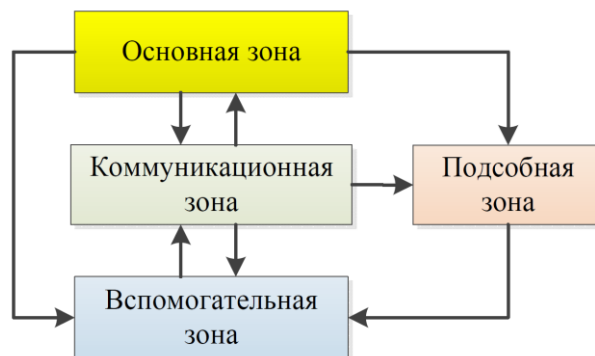


Рис. 2. Функциональная схема зон казармы

Основной зоной являются сгруппированные спальные помещения и их внутренняя коммуникация, к которой относятся проходы между кроватями и минимальные расстояния от внутренних и наружных ограждающих конструкций здания, а также вспомогательная площадь, предназначенная для удовлетворения бытовых и иных нужд, связанных с проживанием военнослужащих. Вспомогательная зона состоит из комнаты для канцелярии подразделения, комнаты командиров взводов, комнаты для хранения оружия, помещения для чистки оружия, комнаты досуга. Подсобная зона состоит из ряда помещений: кладовой имущества подразделения и личных вещей военнослужащих; комнаты для спортивных занятий; комнаты бытового обслуживания; сушилки для просушки обмундирования и обуви; места для хранения верхней одежды; душевой с преддушевой; комнаты для умывания; туалета; комнаты чистки обуви и обмундирования; кладовой (шкафа) уборочного инвентаря; индивидуального теплового пункта; главного распределительного щита; водомерного узла. В коммуникационную зону сгруппированы: входная группа; вестибюль; коридоры; лестничные клетки; запасной выход.

На основе разработанных функциональных зон получена зависимость по расчету общей площади здания казармы, включающая в себя сумму сгруппированных площадей каждой отдельной зоны и описанная в виде

$$S_{\text{общ}} = S_o + S_k + S_b + S_{\text{п}}, \quad (1)$$

где S_o – площадь основной зоны, м^2 ,
 S_k – площадь коммуникационной зоны, м^2 ,
 S_b – площадь вспомогательной зоны, м^2 ,
 $S_{\text{п}}$ – площадь подсобной зоны, м^2 .

1. Площадь основной зоны рассчитывается, исходя из минимального объема воздуха в спальном помещении и его принятой высоты, и определяется по формуле

$$S_o = \frac{H_{\text{п}}}{V_{\text{min}}} T, \quad (2)$$

где $H_{\text{п}}$ – высота помещения [12], м;
 V_{min} – минимальный объем воздуха в спальном помещении, м^3 на 1 чел. [6];
 T – расчетная численность военнослужащих, проживающих в казарме.

В соответствии с документом [6] объем воздуха в спальном помещении должен быть не менее 12 м^3 на 1 чел.

2. Площадь коммуникационной зоны определяется исходя из расчетной численности военнослужащих, проживающих в казарме, ширины коридора, а также способа общего построения военнослужащих в центральном коридоре. Общая зависимость по определению площади коммуникационной зоны имеет вид

$$S_k = \frac{bl_c k_{\text{л}}}{n} T, \quad (3)$$

- где b – ширина коридора i -го типа, м;
 l_c – ширина проекции тела человека в зимней одежде со снаряжением (принимается $l_c = 0,65 \div 0,7$ м), м;
 n – количество шеренг в строю;
 T – расчетная численность военнослужащих, проживающих в казарме;
 $k_{\text{л}}$ – коэффициент, учитывающий площадь лестничных клеток и вестибюля, (принимается $k_{\text{л}} = 1,5$).

В казарменной секции место для построения личного состава подразделения следует предусматривать шириной не менее 2,7 м и размещать, как правило, в центральном проходе спального помещения либо в коридоре-шинельной.

Значение l получено на основе проведенных исследований по антропометрическим параметрам человека и требований [14, 15].

3. Площадь вспомогательной зоны определяется по формуле

$$S_{\text{в}} = \sum S_{\text{адм}} + k_{\text{в}} T, \quad (4)$$

- где $S_{\text{адм}}$ – площадь административного помещения, определяемая по табл. 1, м;
 $k_{\text{в}}$ – коэффициент минимальной площади помещений вспомогательной зоны на 1 чел. (принимается $k_{\text{в}} = 1,35$).

4. Площадь подсобной зоны определяется по формуле

$$S_{\text{п}} = k_{\text{с.у.}} T + k_{\text{б.п.}} T + \sum S_{\text{х.п.}}, \quad (5)$$

- где $k_{\text{с.у.}}$ – коэффициент отношения площадей внутреннего сантехнического оборудования, коммуникаций между ними к одному человеку (принимается $k_{\text{с.у.}} = 0,78$);
 $k_{\text{б.п.}}$ – коэффициент отношения минимальных расчетных площадей бытовых помещений к одному человеку (принимается $k_{\text{б.п.}} = 1,45$);
 $S_{\text{х.п.}}$ – площадь хозяйственного помещения.

Необходимо отметить, что в здании казармы предусмотрены хозяйственные и административные помещения, площади которых не являются зависимыми от общего количества проживающих военнослужащих и принимаются в расчетах как минимальное нормативное значение по документам [6, 16].

Таким образом, на основе проведенных исследований по оптимальной организации помещений в функциональных зонах здания казармы выведена зависимость общей площади здания от количества проживающих в ней военнослужащих, которая может быть определена по следующей формуле:

$$S_{\text{общ}} = T \left(\frac{H_{\text{п}}}{V_{\text{min}}} + \frac{bl k_{\text{л}}}{n} + k_{\text{в}} + k_{\text{с.у.}} + k_{\text{б.п.}} \right) + \sum (S_{\text{адм}} + S_{\text{х.п.}}). \quad (6)$$

На основе предложенного метода расчета выполнены исследования и расчет внутренних зон казармы. Исследования проведены для проживания 60 человек мужского пола.



Рис. 3. Диаграмма отношения площадей функциональных зон к общей площади здания для 60 человек, проживающих в казарме

На рис. 3 показана диаграмма отношения площадей функциональных зон к общей площади здания.

ВЫВОД

Таким образом, полученный способ позволяет сократить сроки проектирования зданий и сооружений общевойскового назначения Министерства обороны, а также сократить сроки ввода их в эксплуатацию.

Список используемых источников

1. Итоги деятельности Министерства обороны Российской Федерации в 2019 году : доклад // Официальный портал правовой информации России. – URL: <https://pravo.gov.ru> (дата обращения: 26.02.2023).
2. Бабкина Н. А., Макеев Н. Ф. Оптимизация объемно-планировочных и конструктивных решений общественных зданий в условиях комфортной среды // Инновационное развитие : междунар. науч. журн. – 2017. – Вып. 8(13) – С. 5–6.
3. О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию : Постановление Правительства РФ от 16.02.2008 № 87 // Официальный портал правовой информации России. – URL: <https://pravo.gov.ru> (дата обращения: 26.02.2023).
4. МРР-11.1-16. Нормы продолжительности проектирования объектов строительства // КонсультантПлюс : справочно-правовая система. – URL: <https://www.consultant.ru/document> (дата обращения: 26.02.2023).
5. СНиП 1.04.03-85*. Нормы продолжительности строительства и задела в строительстве предприятий, зданий и сооружений. Ч. I. Общие положения. Раздел А (подразделы 1–6). – 6. ВСН 35-94. Общевоинские здания // КонсультантПлюс : справочно-правовая система. – URL: <https://www.consultant.ru/document> (дата обращения: 26.02.2023).
7. СП 379.1325800.2018. Общежития и hostels. Правила проектирования // КонсультантПлюс : справочно-правовая система. – URL: <https://www.consultant.ru/document> (дата обращения: 26.02.2023).

8. СП 256.1325800.2016. Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа // КонсультантПлюс : справочно-правовая система. – URL: <https://www.consultant.ru/document> (дата обращения: 26.02.2023).
9. СП 41-101-95. Проектирование тепловых пунктов // КонсультантПлюс : справочно-правовая система. – URL: <https://www.consultant.ru/document> (дата обращения: 26.02.2023).
10. СП 118.13330.2012. Общественные здания и сооружения // КонсультантПлюс : справочно-правовая система. – URL: <https://www.consultant.ru/document> (дата обращения: 20.03.2023).
11. СанПиН 983-72. Санитарные правила устройства и содержания общественных уборных // КонсультантПлюс : справочно-правовая система. – URL: <https://www.consultant.ru/document> (дата обращения: 20.03.2023).
12. ГОСТ 23695-2016. Приборы санитарно-технические стальные эмалированные. Технические условия // КонсультантПлюс : справочно-правовая система. – URL: <https://www.consultant.ru/document> (дата обращения: 26.02.2023).
13. *Мачнев С. А., Загруддинов Ю. А.* Метод оптимизации объемно-планировочных решений специальных фортификационных сооружений на этапе эскизного проектирования // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 663. – С. 90–94.
14. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности : приказ МЧС РФ от 30.06.2009 № 382 [зарегистрировано в Минюсте РФ 06.08.2009 № 14486] // Официальный портал правовой информации России. – URL: <https://pravo.gov.ru> (дата обращения: 26.02.2023).
15. Устав внутренней Службы Вооруженных Сил Российской Федерации [в ред. Указов Президента РФ от 14.01.2011 № 38, от 29.07.2011 № 1039, от 14.01.2013 № 20] // Официальный портал правовой информации России. – URL: <https://pravo.gov.ru> (дата обращения: 26.02.2023).
16. СП 44.13330.2011. Административные и бытовые здания // КонсультантПлюс : справочно-правовая система. – URL: <https://www.consultant.ru/document> (дата обращения: 26.02.2023).

Б. Д. Казахов,
доктор военных наук, профессор;
О. Э. Каминский,
кандидат военных наук, доцент;
К. Б. Салтыков,
кандидат военных наук

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ОБОСНОВАНИЮ СУЩНОСТИ И НОМЕНКЛАТУРЫ ПОКАЗАТЕЛЕЙ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ ВОЗМОЖНОСТИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЦЕЛЕВЫХ ЗАДАЧ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ ЗАПУСКА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Представлен подход к оцениванию возможностей организационно-технической системы запуска космических аппаратов по выполнению целевой функции. Предлагается номенклатура возможностей организационно-технической системы запуска космических аппаратов, учитывающая свойства самой системы и особенности выполняемых ею задач. Сформированы предложения по графической визуализации возможностей организационно-технической системы запуска космических аппаратов для обеспечения деятельности органов управления на этапе всесторонней оценки обстановки и принятия рационального решения на организованное использование подчиненных сил и средств.

Ключевые слова: свойства системы, эффективность функционирования системы, система показателей, оценка возможностей по выполнению целевой функции.

ВВЕДЕНИЕ

Анализ действующих нормативно-правовых документов и других источников, регламентирующих вопросы подготовки и функционирования организационно-технической системы (ОТС) запуска космического аппарата (КА), свидетельствует о том, что научная задача, связанная с формированием системы показателей, которые оценивают их потенциал по выполнению целевой функции, не решена. Вместе с тем данные показатели являются обязательным инструментом деятельности органов управления (ОУ) в ходе всесторонней оценки обстановки и принятия рационального решения на организованное использование подчиненных сил и средств. Наличие такого проблемного вопроса затрудняет эффективное решение управленческих задач данными ОУ и требует его разрешения.

Возможный путь разрешения указанного противоречия, который будет далее рассмотрен в статье, предполагает последовательное выполнение следующих шагов:

– обоснование классификации возможностей ОТС запуска КА, включающее, в том числе, рассмотрение возможностей ОТС как проявлений ее свойств, обусловленных назначением и задачами системы, а также декомпозицию основной задачи ОТС как метасистемы на подзадачи, которые выполняют ее подсистемы, и анализ их содержания;

– выявление особенностей выполнения задач ОТС (сроки, типовые условия выполнения задач и др.);

– определение номенклатуры показателей, характеризующих возможности ОТС как проявления ее свойств при выполнении типовых задач ее подсистемами;

– определение удобной формы представления совокупности показателей для оперативной оценки возможностей ОТС запуска КА лицом, принимающим решение по ее целевому использованию.

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО КЛАССИФИКАЦИИ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЗАПУСКА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Организационно-технические системы запуска КА являются целенаправленно функционирующими (целеустремленными). Они обладают набором определенных свойств, обеспечивающих выполнение задач системы. Возможности ОТС могут проявляться как собственно ее свойства и как свойства процесса, реализуемого ОТС в ходе ее функционирования. Рассмотрим их более подробно.

Совокупность свойств ОТС, обуславливающих ее пригодность для функционирования по назначению, образует качество ОТС. Качество ОТС зависит только от ее строения, поскольку свойства ОТС, в свою очередь, зависят только от свойств объектов, составляющих ОТС и их организации в единое целое, т. е. от особенностей структуры ОТС.

Свойства ОТС запуска КА могут быть классифицированы по нескольким группам [1]:

- общесистемные свойства: целостность, полнота, эмерджентность и т. д.;
- свойства собственно организационно-технической системы: свойства персонала, свойства вооружения и военной техники (ВВТ); последние классифицируются как тактико-технические и эксплуатационно-технические;
- основные свойства сложной ОТС: динамичность (интенсивность действий), самоорганизация, производственные возможности (возможности по предназначению), готовность к выполнению задач, устойчивость, управляемость, организованность, наблюдаемость, интеллект, скрытность, самодостаточность (автономность);
- свойства прикладной системы: ресурсность (способность содержания и обновления запаса ресурсов), интегративность (способность интеграции частей и приобретение дополнительных свойств такими совокупностями).

В общем случае степень проявления свойств ОТС, т. е. ее возможности, ограничена следующими факторами:

- совершенством самой ОТС (совершенством компонентов ОТС и их структурной организации в единое целое);
- влиянием внешней среды (в том числе противоборствующих ОТС),
- условиями функционирования ОТС (управляемые условия: штаты, нормы снабжения и т. п.; неуправляемые: природно-климатические и др.).

Свойства процесса, реализуемого используемой ОТС (т. е. свойства процесса запуска космического аппарата), представляют собой совокупность свойств, обуславливающих его пригодность для достижения цели функционирования (получения запланированного результата), т. е. эффективность функционирования ОТС запуска космического аппарата (КА).

Эффективность функционирования ОТС запуска КА целесообразно рассматривать как комплексное свойство, представляющее собой совокупность трех более простых свойств:

- 1) результативности – свойства процесса давать целевой итог (т. е. результат, ради которого организовано и осуществляется функционирование ОТС);
- 2) оперативности – свойства, характеризуемого расходом времени, потребным для осуществления функционирования ОТС;
- 3) ресурсоемкости – свойства, характеризуемого расходом ресурсов (материально-технических, финансовых, людских и т. д.), необходимых для осуществления функционирования ОТС.

Заметим, что функционирование ОТС может рассматриваться и как выполнение отдельной частной целевой задачи, и как выполнение совокупности однородных целевых задач за определенный временной промежуток.

Полезный эффект может проявляться двояко:

– в формате наступления или ненаступления некоторого события (явления). В данном случае эффект характеризуется качественной величиной, оцениваемой значениями бинарной шкалы: наличие («1») или отсутствие («0») эффекта;

– в формате получения какого-то количества определенной продукции (вещества, энергии, информации или наступления совокупности событий). В этом случае характеризующая его величина является количественной и измеряется в относительной или в абсолютной шкале. В случае существенных затруднений с количественной оценкой выходного эффекта может также использоваться шкала вербальных значений.

Возможности ОТС запуска КА зависят от многих факторов, имеющих случайный характер. Поэтому значения показателей возможностей есть величины непостоянные, они изменяются в зависимости от складывающейся обстановки и носят вероятностный характер. Вместе с тем ОТС запуска КА представляет собой целеустремленную систему [2], компенсирующую негативное воздействие целого ряда факторов за счет внутренних ресурсов и структурных особенностей, что позволяет снизить неопределенность исхода функционирования системы. Четкое и однозначное понимание лицом, принимающим решение, (ЛПР) достаточности возможностей ОТС для выполнения поставленной задачи требует наличия обоснованных критериев, также позволяющих устранить неопределенность восприятия оценок, формируемых по шаблону типа «вероятность выполнения задачи оценивается на уровне 0,7». Форма представления возможностей ОТС должна способствовать их простому и быстрому оцениванию, должна быть удобна для работы лиц, принимающих и формирующих решение.

Факторы и условия, определяющие границы возможностей (меру или интенсивность проявления свойств ОТС и свойств реализуемых ими процессов), можно объединить в три группы:

1) *внешние*: воздействие противостоящих ОТС космического, воздушного, морского и наземного базирования, выполняющих задачи наблюдения, поражения, противодействия и т. д.;

2) *внутренние*: несовершенство и старение ВВТ; ограниченность ресурсов и срыв сроков их поставки; нарушения безопасности военной службы; происшествия и преступления, аварии и катастрофы по вине личного состава; ошибки должностных лиц органов управления; ошибки номеров расчетов при выполнении технологических операций; невыполнение положений нормативных документов и эксплуатационной документации, задач и планов; некомпетентность, моральная деградация, психологическая неустойчивость личного состава и т. д.;

3) *условия обстановки*: ограниченный ресурс времени, неблагоприятные метеоусловия, последствия чрезвычайных ситуаций на транспорте и на потенциально опасных объектах, риски обрушения, пожары, затопления, геологические опасные явления, эпидемии и эпизоотии и т. д.

Возможности ОТС запуска КА складываются из тактико-технических свойств ВВТ и способности личного состава максимально их реализовать в различных условиях обстановки.

Целью оценки возможностей ОТС являются:

– установление степени соответствия расчетных значений показателей возможностей требуемым, вытекающим из содержания выполняемой задачи;

– выявление причин несоответствия.

На основе результатов оценки возможностей формулируются выводы и предложения, необходимые ЛПР для определения (уточнения) замысла, выработки и принятия решения на целевое использование ОТС.

Значения показателей возможностей должны оцениваться (рассчитываться) с учетом свершившегося, происходящего и прогнозируемого (возможного) воздействия всех групп факторов и условий обстановки.

В ходе заблаговременной подготовки к целевому использованию осуществляются обоснование показателей возможностей, оценка возможностей в полном объеме для типовых вариантов выполнения стоящих перед ОТС задач в различных условиях обстановки (максималь-

но благоприятные – промежуточные – максимально неблагоприятные), моделирование для отработки в ходе мероприятий боевой подготовки.

При непосредственной подготовке и в ходе функционирования проводится уточнение возможностей по отдельным показателям с учетом выявленных изменений в составе и состоянии сил и средств противодействующей ОТС, изменений условий функционирования, а также изменений состава сил и средств своей ОТС.

Добавим, что при оценке возможностей целесообразно сначала выполнить грубую оценку по бинарному критерию «способен – не способен» (выполнить задачу). В случае неспособности ОТС выполнить задачу в сложившихся условиях обстановки ЛПП с помощью подчиненного ему органа управления должно выработать перечень мер, направленных на устранение (компенсацию) действия тех факторов, которые препятствуют выполнению задачи. Данные меры могут быть реализованы самостоятельно – силами и средствами ОТС, либо для их реализации может потребоваться помощь ресурсами вышестоящей ОТС. Такая оценка с учетом принятия указанных выше мер представляет собой более точную оценку условной способности ОТС выполнить задачу (т. е. способности выполнить задачу при выполнении некоторого условия или совокупности условий).

Основными методами оценки возможностей являются: аналитический, графоаналитический, методы математического моделирования, натуральных испытаний и системного анализа. Выбор метода осуществляется с учетом поставленных задач оценки, располагаемого времени, требуемой точности, квалификации персонала, имеющихся средств автоматизации и программного обеспечения.

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ОБОСНОВАНИЮ НОМЕНКЛАТУРЫ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЗАПУСКА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Сущностью функционирования ОТС запуска КА является осуществление совокупности согласованных по целям, задачам, месту и времени мероприятий и действий расчета ОТС по запуску КА, т. е. выполнение задачи подготовки и проведения в установленные сроки запусков КА для развертывания и поддержания в установленном составе орбитальных группировок космических систем (комплексов) [3].

Указанная задача может быть декомпозирована на ряд подзадач следующим образом:

- хранение запасов космических средств (КСр) – КА, ракет-носителей (РН), разгонных блоков (РБ) – и компонентов ракетного топлива (КРТ);
- перевод и поддержание запаса КСр в заданных технических готовностях к применению;
- предпусковая подготовка составных частей (СЧ) и ракеты космического назначения (РКН) на техническом комплексе (ТК);
- предстартовая подготовка ракеты космического назначения (РКН) на стартовом комплексе (СК);
- пуск РКН;
- выведение КА в заданную точку орбиты;
- осуществление послепусковых работ на СК;
- оценка готовности КА к использованию по назначению.

Подзадача выведения КА в заданную точку орбиты на практике сводится к выполнению сеансов измерений на активном участке траектории (АУТ) РКН, их обработке и анализу, поскольку вне АУТ космические средства работают в автоматическом режиме, а средства ОТС запуска КА не используются.

Подзадача оценки готовности КА к использованию по назначению выполняется ОТС управления КА и при дальнейшем анализе не рассматривается. Остальные подзадачи выполняются подсистемами ОТС запуска КА, каждая из которых имеет свой уникальный состав

сил и средств, что обусловлено неравномерным распределением между ними задач как по их содержанию, так и по типу космических средств.

В соответствии с представленными выше подзадачами, ОТС, созданная для выполнения метазадачи запуска КА, обладает рядом специфических свойств, наличие которых и позволяет ее подсистемам выполнять данные подзадачи. От степени проявления тех или иных свойств зависит успешность выполнения как отдельных подзадач, так и метазадачи в целом. Заметим, что совокупность отдельных относительно простых свойств позволяет говорить о наличии у ОТС запуска КА комплексного свойства – способности осуществлять запуск КА установленной номенклатуры в заданные сроки и в заданную область космического пространства.

Поскольку каждое из свойств ОТС запуска КА может быть описано количественно или качественно с помощью некоторой переменной, значение которой показывает меру проявления данного свойства, необходимо установить соответствие между подзадачами и частными показателями, характеризующими отдельные свойства, определив также их наименование, характер (качественный или количественный), обозначение и единицу измерения. Критерий оценивания значений показателей целесообразно увязать со способностью выполнения той или иной подзадачи, используя три уровня:

- 1) «способен (факторы, определяющие способность, позволяют) выполнить...»;
- 2) «способен (факторы, определяющие способность, позволяют) выполнить при условии...»;
- 3) «не способен (факторы, определяющие способность, не позволяют) выполнить...».

Анализ представленных выше подзадач и специфики их выполнения позволил определить показатели, характеризующие возможности ОТС запуска КА и ее подсистем, а также выработать вербальные формулы соответствующих им критериев оценивания (рис. 1).

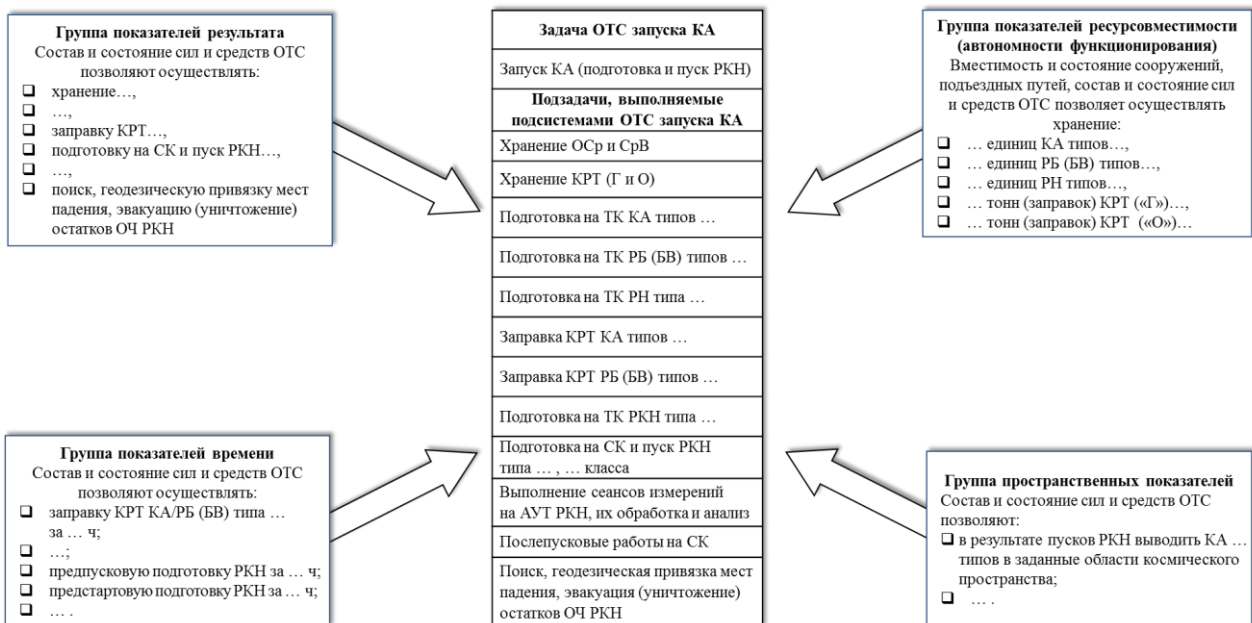


Рис. 1. Декомпозиция задачи ОТС запуска КА, группы показателей, характеризующих ее возможности, и примеры критериев их оценивания

Отметим, что подзадача поиска, геодезической привязки мест падения, эвакуации (уничтожения) остатков отделяющихся частей (ОЧ) РКН реально выполняется ОТС запуска КА, однако она не оказывает влияния на процесс и результат запуска и по указанной причине не является обязательной для выполнения в сложных условиях обстановки и из дальнейшего рассмотрения исключается.

Все показатели могут быть объединены в несколько групп:

- группа показателей результата;
- времени и оперативности выполнения каждой подзадачи подсистемами и метазадачи ОТС;
- ресурсовместимости (или автономности функционирования) ОТС;
- пространственные показатели ОТС.

Показатели для каждого типа космических средств, компонента ракетного топлива, технического и стартового комплекса устанавливаются и рассчитываются отдельно.

Совокупность показателей, характеризующих предпусковую подготовку СЧ РКН (КА, РБ, РН) и РКН на ТК, может использоваться полностью (или в различных сочетаниях этих показателей) при выполнении задач подготовки СЧ и РКН различными подсистемами ОТС. При выполнении задач подготовки СЧ и РКН одной подсистемой ОТС может использоваться только один соответствующий показатель.

Ввиду особой важности операций заправки КА и РБ могут вводиться дополнительные показатели, характеризующие их: время заправки КА и время заправки РБ для каждого типа изделий.

С учетом директивно заданного срока выполнения метазадачи ОТС показатели результата целесообразно оценивать исходя из условия выполнения подзадачи за нормативно заданное эксплуатационной документацией время, т. е. способность подсистемы ОТС выполнить ту или иную подзадачу может быть охарактеризована показателем времени ее выполнения. Оценку способности выполнения сеансов измерений на АУТ РКН, их обработку и анализ целесообразно увязать со своевременностью проведения указанных операций.

Предлагаемый вариант показателей возможностей ОТС запуска КА в зависимости от подзадач, выполняемых ее различными подсистемами, представлен в табл. 1.

Таблица 1

Показатели возможностей ОТС запуска КА (вариант)

Подзадача, выполняемая подсистемой ОТС	Свойство ОТС или реализуемого ею процесса	Показатель			Группа показателей	
		Наименование	Обозначение	Ед-цы измерен.		
Хранение запаса КА, РБ, РН, КРТ	Способность автономно функционировать по запасам КСр и КРТ (размещать и хранить запасы КСр и КРТ)	Количество находящихся в запасе (в местах хранения ОТС)	КСр	$N_{КА}, N_{РБ}, N_{РН}$	ед.	Ресурсовместимости
			КРТ	$N_{КРТ}$	т (кг)	
Подготовка ТК, СК к использованию	Способность осуществлять приведение ТК (СК) в готовность к работе с КСр за нормативно заданное время	Время приведения ТК, СК в готовность к работе с КСр	$T_{ТК}, T_{СК}$	ч	Временные	
...	
Предпусковая подготовка РКН на ТК	Способность осуществлять подготовку РКН на ТК за нормативно заданное время	Время подготовки РКН на ТК (время предпусковой подготовки)	$T_{ПП}$	ч	Временные	
Предстартовая подготовка РКН на СК	Способность осуществлять подготовку РКН на СК за нормативно заданное время	Время подготовки РКН на СК (время предстартовой подготовки)	$T_{ПС}$	ч	Временные	
...	
Выведение КА в заданную точку орбиты	Способность обеспечивать достижение заданной области космического пространства и размещение в ней ОСр	Высота рабочей орбиты КА	H	км	Пространственные	
		Наклонение рабочей орбиты КА	i	град.		
...	
Проведение послепусковых работ на СК	Способность осуществлять приведение СК в готовность к проведению последующих пусков	Время приведения СК в готовность к проведению последующих пусков	$T_{ППР}$	ч (рабоч. дни)	Временные	

После расчета значения каждого из показателей целесообразно сформировать их обобщенное графическое отображение, которое позволяет наглядно представить результаты выполненных расчетов лицу, принимающему решение, в интересах оценивания им способности ОТС выполнить поставленную задачу. Для графической визуализации возможностей ОТС удобно использовать лепестковую диаграмму из средств программы *Word* пакета *MS Office* (рис. 2) [4].

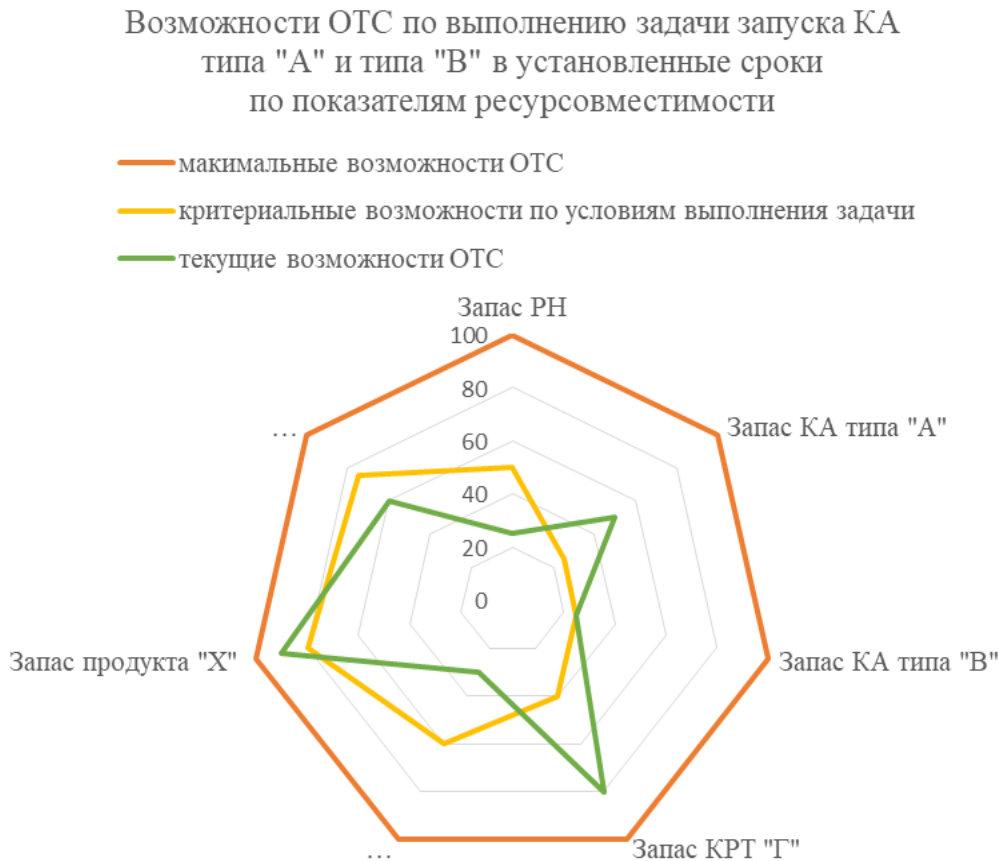


Рис. 2. Пример графического отображения возможностей ОТС запуска КА по показателям ресурсо совместимости

Результаты расчетов значений всех показателей выражаются в относительных единицах, причем за 100% принимается значение показателя, соответствующее максимально возможному уровню проявления соответствующего свойства ОТС или ее подсистемы. На диаграмме данные значения отображаются в виде вершин правильного многоугольника, связанных цветной ломаной линией, описывающей внешнюю границу фигуры. Также в относительных единицах выражаются значения показателей, минимально необходимые для выполнения конкретной поставленной задачи (отражают критериальный или критический уровень проявления свойств). На диаграмме они отображаются в виде соединенных линией другого цвета вершин неправильного многоугольника, находящегося внутри первой фигуры. Аналогичным образом выражаются и отображаются на диаграмме и значения показателей, отражающие текущие возможности ОТС (линия также имеет свой цвет, отличный от предыдущих). Перевод значений всех показателей в относительные единицы позволяет отобразить их в пределах одной диаграммы и получить полную картину достаточности возможностей ОТС для выполнения задачи на текущее время.

Например, хранилище космических средств позволяет осуществлять хранение трех РН определенного типа, еще одна РН аналогичного типа может содержаться в состоянии поставки на технической позиции (с учетом возможности выполнения требований эксплуата-

ционной документации). Следовательно, максимум показателя автономности функционирования (ресурсовместимости) по запасам РН будет равен четырем изделиям (100%). Текущие возможности ОТС по данному показателю выражаются числом реально хранящихся РН, например 1 (25%). Минимально необходимое значение показателя для выполнения поставленной задачи запуска двух КА составляет два однотипных РН (50%). Очевидно, что текущие возможности ОТС недостаточны для выполнения задачи, однако она может быть выполнена при условии поставки РН в приемлемые по условиям задачи сроки, что и предстоит оценить ЛПР далее.

Для удобства восприятия информации диаграммы могут строиться отдельно по каждой группе показателей, а затем сводится в одну, отражающую весь спектр возможностей ОТС.

На основании оценок возможностей ОТС по всем показателям может быть сделан обоснованный вывод о способности ОТС выполнить поставленную задачу в соответствии с критерием (табл. 2), позволяющим учесть критичность влияния условий обстановки на те или иные возможности ОТС, заданные сроки выполнения задачи, а также необходимость и возможность привлечения дополнительных ресурсов для ее выполнения.

Таблица 2

Критерии оценивания способности ОТС выполнить поставленную задачу

Обобщенный вывод из оценки обстановки	Оценка способности ОТС выполнить поставленную задачу
Условия обстановки не оказывают критического влияния на возможности ОТС, проблемные ситуации отсутствуют	ОТС способна выполнить задачу в заданный срок, привлечение дополнительных ресурсов не требуется
Условия обстановки создают проблемную ситуацию и оказывают критическое влияние на возможности ОТС	ОТС способна выполнить задачу в заданный срок, разрешив проблемную ситуацию с привлечением собственных ресурсов
	ОТС способна выполнить задачу в заданный срок, разрешив проблемную ситуацию с привлечением ресурсов взаимодействующей или вышестоящей ОТС
	ОТС не способна выполнить задачу в заданный срок, несмотря на возможное привлечение дополнительных ресурсов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный подход к оцениванию возможностей ОТС запуска КА основан на ряде теоретических и прагматических положений, учитывающих свойства самих рассматриваемых систем, свойства реализуемых ими процессов, а также особенности выполняемых ими задач. Средства графической визуализации возможностей ОТС в виде лепестковых диаграмм позволяют:

- учитывать показатели по различным отдельным группам и интегрально;
- оценивать их значения и влияние на общую способность ОТС выполнить задачу, отобразить результаты прогноза изменения данной способности с учетом принятия необходимых и возможных компенсационных воздействий на состояние ОТС как совокупность ее наиболее значимых возможностей.

Представленный методический инструментарий может быть использован лицами, формирующими и принимающими решение на целевое использование ОТС запуска КА при реализации ими управленческого цикла в различных условиях обстановки.

Список используемых источников

1. Системный анализ организационно-технических систем космического назначения : учебник / А. Н. Павлов [и др.]; под общ. ред. д-ра техн. наук, доц. А. Н. Павлова. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2018. – 360 с.
2. Петухов Г. Б. Основы теории эффективности целенаправленных процессов. – СПб. : МО СССР, 1989. – Ч. 1. : Методология, методы, модели. – 647 с.
3. Теория и практика эксплуатации объектов космической инфраструктуры / Н. Д. Аникейчик [и др.]. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – Т. 1. : Объекты космической инфраструктуры. – 400 с.
4. Основы современных компьютерных технологий : учебник / Г. А. Брякалов [и др.]; под ред. А. Д. Хомоненко. – СПб. : КОРОНА-принт, 2005. – 672 с.

Ю. В. Козлов,
кандидат военных наук;
М. А. Кукушкин,
кандидат военных наук;
Д. Ю. Пономарев

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНИВАНИЮ КОЛИЧЕСТВЕННО-КАЧЕСТВЕННОГО СООТНОШЕНИЯ СИЛ ПРОТИВОБОРСТВУЮЩИХ СТОРОН В ТАКТИЧЕСКОМ ЗВЕНЕ УПРАВЛЕНИЯ

В статье предлагается усовершенствованный математический аппарат оценивания количественно-качественного соотношения сил противоборствующих сторон, использующий теоретико-множественный подход к представлению данных о различных воинских формированиях тактического уровня. Результаты обработки исходной информации о количественно-качественном соотношении сил противоборствующих сторон на предстоящие боевые действия, использующие предлагаемый математический аппарат, предоставляют возможность командиру обоснованно выбрать наиболее приемлемый вариант решения из некоторого множества реализуемых (возможных).

Ключевые слова: силы противоборствующих сторон, исходные данные, решение командира.

ВВЕДЕНИЕ

Военный конфликт в настоящее время представляет собой борьбу передовых технологий при доминировании высокоточных средств поражения. Широкое применение находят беспилотные средства поражения и обеспечения действий войск. Целый ряд ранее созданных средств вооруженной борьбы во взаимодействии с беспилотными средствами приобретают сейчас повышенные возможности в поражении сил и средств противоборствующей стороны, а число вариантов их совместного применения выросло лавинообразно [1]. Это обстоятельство объективно требует адекватного совершенствования аппарата оценивания количественно-качественного соотношения сил противоборствующих сторон. Под силами противоборствующих сторон в настоящей статье будем понимать личный состав формирований тактического уровня своих войск и войск противника, их вооружение, военную технику и материальные средства.

Задачу оценивания соотношения сил противоборствующих сторон традиционно принято решать с помощью аналитических моделей Осипова – Ланчестера. Адаптация модели под конкретный состав неоднородных формирований осуществляется путем определения их обобщенных «эффективных» потенциалов, представляющих собой скалярное произведение собственных векторов матриц интенсивностей и векторов численностей группировок [2]. В этом случае «эффективный» потенциал представляет собой средневзвешенную численность группировок сторон, где в качестве весовых коэффициентов выступают нормированные соотношения интенсивностей поражающего действия неоднородных сил сторон. Чем больше интенсивность поражающего действия боевого средства, тем больший вес оно получает в «эффективном» потенциале группировки. Однако нахождение собственных значений и векторов для матриц интенсивностей большой размерности сопряжено с определенными вычислительными трудностями; результаты получаются усредненными, с достаточно большой погрешностью, и применяются в основном для больших группировок войск. Командиру же тактического звена модели Осипова – Ланчестера не дают адекватной картины, особенно при использовании автоматизированных систем управления войсками [3].

Приобретая практический опыт применения своих сил в различных условиях обстановки, накапливая и систематизируя его со временем, командир, конечно, вырабатывает способность самостоятельно оценить соотношение состава своих сил и сил противника в условиях сложившейся обстановки. Но формализация исходной информации, поступающей в режиме реального времени, с использованием теоретико-множественного подхода, отражающая реальные процессы, позволит реализовать один из вариантов подхода к проблеме современной военной теории – переложению задач военного искусства на формализованный язык математики с последующим применением вычислительной техники [4].

Для совершенствования математического аппарата оценивания количественно-качественного соотношения сил противоборствующих сторон, повышения обоснованности при принятии решения командиром на применение своих сил предлагается использовать теоретико-множественный подход к представлению исходной информации о своих силах и силах противника.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ О СООТНОШЕНИИ СИЛ ПРОТИВОБОРСТВУЮЩИХ СТОРОН В ФОРМАЛИЗОВАННОМ ВИДЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРЕТИКО-МНОЖЕСТВЕННОГО ПОДХОДА

Обозначим возможные варианты состава своих сил и возможные варианты состава сил противника в виде множеств. Каждый вариант состава сил характеризуется определенными признаками целевого предназначения и обладает информацией о результатах применения его по предназначению в военных конфликтах, как правило, за последние 3–5 лет. Обозначим полученные множества своих сил и сил противника R и B соответственно [5]. Тогда

$$R = \{r | \forall (l, k \in K, l \neq k) (r_l \in R_k \Rightarrow r_l = r_l^{(k)}) \wedge F(R_k)\}, \quad (1)$$

где R – множество вариантов состава формирований своих сил;
 r – информация о результатах применения формирований своих сил;

$$F(R_k) = (R_k \neq \emptyset \wedge \bigcup_{k=1}^K R_k = R \wedge R_k \neq R_l), \quad (2)$$

где $F(R_k)$ – потенциальные возможности действий формирований своих сил;

$$B = \{b | \forall (l, i \in Y, l \neq i) (b_l \in B_i \Rightarrow b_l = b_l^{(i)}) \wedge F(B_i)\}, \quad (3)$$

где B – множество, состоящее из возможных вариантов состава формирований сил противника;

b – информация о результатах применения формирований сил противника;

$$F(B_i) = (B_i \neq \emptyset \wedge \bigcup_{i=1}^Y B_i = B \wedge B_i \neq B_l). \quad (4)$$

где $F(B_i)$ – потенциальные возможности действий формирований сил противника.

Подобное формальное представление в теории множеств предполагает разбиение множеств на классы, внутри которых элементы связаны отношением эквивалентности (толерантности). Пусть любые два элемента (рассмотрим на примере множества R : $r_m^{(k)}$ и $r_n^{(k)}$; $m, n \in M$, $m \neq n$) одного класса k находятся в отношении p : $r_m^{(k)} p r_n^{(k)}$, т. е. эквивалентны по отношению p (возможности), а любые два элемента различных классов в этом отношении не находятся. Из этого следует:

$$R_k = \{r^{(k)} / r^{(k)} \in R \wedge \forall (m, n \in M, m \neq n) (r_m^{(k)} p r_n^{(k)} \Rightarrow p_m^{(k)} \simeq p_n^{(k)})\}, \quad (5)$$

где $p_m^{(k)}$, $p_n^{(k)}$ – возможные варианты состава формирований $m(n)$ класса k стороны R .

На каждом из множеств R устанавливаются области R_k , различие между элементами в которых $r_m^{(k)}$ и $r_n^{(k)}$, $m \neq n$ оказывает несущественное влияние на результаты выполнения задачи по показателю возможностей выбора варианта применения конкретного вида вооружения p и в полном объеме отражается в упорядоченной структуре и количестве элементов (мощности) множеств [6]:

$$\forall(k \in K) \forall(i \in I) (R = \bigcup_{k=1}^K R_k = \{r_i^{(1)}\}_{I_1} \cup \dots \cup \{r_i^{(K)}\}_{I_k}), \text{ где } I_1 + \dots + I_k = I, K = \overline{1, k}; \quad (6)$$

$$\forall(i \in I) (k = I \Rightarrow R = R_1 = \{r_i^{(1)}\}_I = (r_1^{(1)}, r_2^{(1)}, \dots, r_I^{(1)})), \text{ где } i = \overline{1, I}; \quad (7)$$

$$k, i = I \Rightarrow R = \{r_1^{(1)}\}_1 = r, \quad (8)$$

Множество R , которое состоит из I элементов r_i , классифицируемых по отношению p на K классов (6), может состоять как из одного R_I класса (7), так из одного элемента r_b . Теоретический вариант, если $R = \emptyset$ (пустое множество), свидетельствует о том, что в прошлом информации о применении формирований противника в составе набора вариантов множества R нет. Спрогнозировать в данном случае соотношения своих сил со стороны B невозможно.

Данный (крайний случай) демонстрирует разницу между методиками оценки сил сторон и их возможностей. Соотношение $R = \emptyset$ говорит о том, что такой вариант системы ($r^{(0)}$) существует, но из-за отсутствия информации о результатах ее применения в прошлом $r^{(0)} \notin R$ невозможно точно предсказать, в каких условиях обстановки какому составу вариантов применения сил b_k противника она будет соответствовать.

При наличии достоверной информации о противнике простое соотношение сил r_i/b_k , рассматриваемое вне конкретных условий их применения, не является достаточным условием для обоснованного решения на бой. Этим обусловлена необходимость введения в анализ множества условий обстановки S (в том числе созданную логистику как с одной, так и с другой стороны) со структурой и свойствами, аналогичными множествам R, B [6]:

$$S = \{s / \forall(l, n \in N, l \neq n) (s_j \in S_n \Rightarrow s_j = s_j^{(n)} \wedge F(S_n))\}, \quad (9)$$

где $j = \overline{1, J}$

$$F(S_n) = (S_n \neq \emptyset \wedge \bigcup_{n=1}^N S_n = S \wedge S_n \neq S_1), \quad (10)$$

где $n = \overline{1, N}$

$$S_n = \{s^{(n)} / s^{(n)} \in S \wedge \forall(m, k \in M, m \neq k) (s_m^{(n)} p_s^{(n)} \Rightarrow p_m^{(n)} \simeq p_k^{(n)})\}. \quad (11)$$

В целом данная формализация представлений и отношения между структурами в геометрической интерпретации отражены на рис. 1, где представлен вариант подхода к оценке соотношения сил с позиций формальных представлений. Структура, разбиение на классы и содержание множеств B, R, S , а также отношения между ними отражают экспериментальный материал применения системы r_i в соответствующей обстановке (b_k, s_j). Представленные структуры и отношения между ними носят условный характер и могут быть наполнены реальным содержанием при анализе исходных данных о вариантах применения сил и средств на математических моделях.

В описываемом случае набор элементов b_k, r_i и s_j , связанных графами отношений, отображает варианты их применения.

На рис. 1 графически представлено теоретико-множественное описание эквивалентности возможностей p_1 и p_2 для системы $r_i^{(l)}$ [6–8]:

$$R = \{r / \forall(i \in I) \forall(k \in K) (r_i \in R_k \wedge \bigcup_{k=1}^K R_k = R)\}; n, l \in \{k\}_K, \text{ где } l = \overline{1, L} \quad (12)$$

где R – множество возможных вариантов формирований своих сил;

$$B = \{b / \forall(k \in K) \forall(i \in I) (b_k \in B_i \wedge \bigcup_{i=1}^I B_i = B)\}; n, l \in \{i\}_I, \quad (13)$$

где B – множество возможных вариантов формирований сил противника;

$$S = \{s / \forall(j \in J) \forall(l \in L) (s_j \in S_l \wedge \bigcup_{l=1}^L S_l = S)\}; n, k \in \{l\}_L, \quad (14)$$

где S – множество возможных условий обстановки

$$((b_k^{(n)} \wedge s_j^{(n)}) \Rightarrow r_i^{(l)}) \wedge ((b_k^{(i)} \wedge s_j^{(k)}) \Rightarrow r_i^{(l)}) \Rightarrow \quad (15)$$

$$((b_k^{(n)} \wedge s_j^{(n)}) \simeq (b_k^{(i)} \wedge s_j^{(k)}));$$

$$((p_1 = \langle b_k^{(n)}, s_j^{(n)}, r_i^{(l)} \rangle) \wedge (p_2 = \langle b_k^{(i)}, s_j^{(k)}, r_i^{(l)} \rangle)) \Rightarrow p_1 \simeq p_2. \quad (16)$$

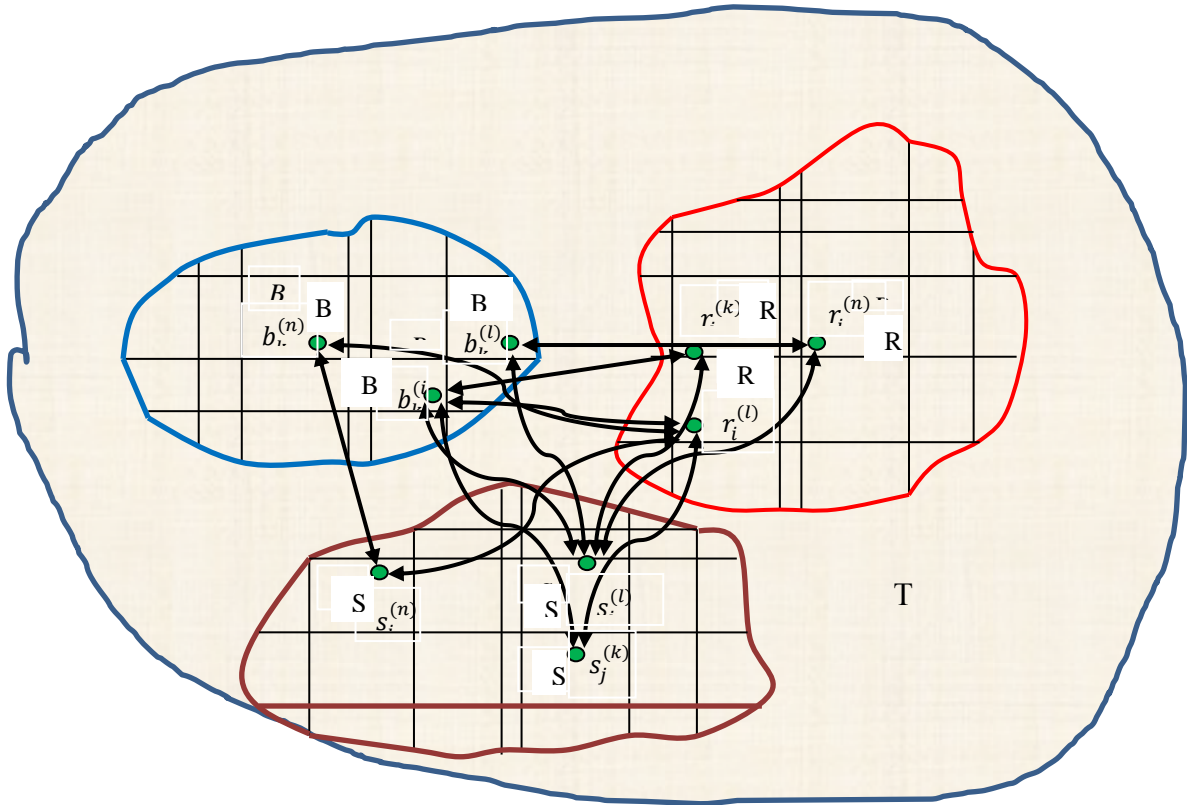


Рис. 1. Схема отношений между элементами множеств

ПРИМЕНЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА ТЕОРИИ МНОЖЕСТВ ДЛЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ВАРИАНТОВ СООТНОШЕНИЯ СИЛ СТОРОН В ПОМОЩЬ КОМАНДИРУ ТАКТИЧЕСКОГО ЗВЕНА

После формализованного представления основных вариантов обстановки можно перейти к следующему уровню интерпретации: отношения между множествами состава сил в различной обстановке R , B , и S в форме графов заменяются соотношениями, которые можно пояснить графически на рис. 2 и 3.

После рассмотрения вариантов состава сил и обстановки, составляющих множества и отношений между ними, необходимо отметить, что варианты применения соответствующих составов сил и их возможностей определяются совокупностью b_k , r_i и s_j , т. е.

$$\forall(k, i, j) (b^{(c)} \wedge s^{(a)} \wedge r^{(d)}) \Rightarrow p \approx \omega_k, \tag{17}$$

где ω_k – k -й вариант применения сил и средств.

Переходя к общему случаю, определим декартовым произведением область P :

$$P = R \times B \times S = \{ \langle r, b, s \rangle / r \in R \wedge b \in B \wedge s \in S \}, \tag{18}$$

где P – множество вариантов реализуемых возможностей.

Множество вариантов (рис. 2) реализуемых возможностей P_δ , где вариант $p = \langle r, b, s \rangle$ для R нарядов своих сил по нанесению ущерба каждому из B нарядов сил противника в S условиях обстановки, определяется выражением

$$\sum \delta p = / \{ r_i \} \cdot / \{ b_k \} \cdot / \{ s_j \} / \Rightarrow \{ \omega_n \}_N; \quad i, k, j = \overline{m, n}, \tag{19}$$

где $\delta p \in P_\delta$, $\{ \omega_n \}_N = \{ \langle r, b, s \rangle / \omega \subseteq R \times B \times S \wedge N \subseteq / R \cdot / B \cdot / S \}$.

На рис. 2. выделена область множества P : $P_\delta \subset P$, каждый элемент которой отображает возможности ω нарядов сил из состава – $r_m^{(1)}, \dots, r_n^{(1)}$ при воздействии по каждому из нарядов

сил $- b_m^{(1)}, \dots, b_n^{(1)}$ в диапазоне условий обстановки $- s_m^{(1)}, \dots, s_n^{(1)}$. В этом случае каждый вариант ω характеризуется тройкой параметров $\langle r, b, s \rangle$, а соотношение $b \Leftrightarrow r$ при этом отражает оценку соотношения сил сторон для решения конкретной задачи из условия $p = \{ \langle r, b, s \rangle \}$.

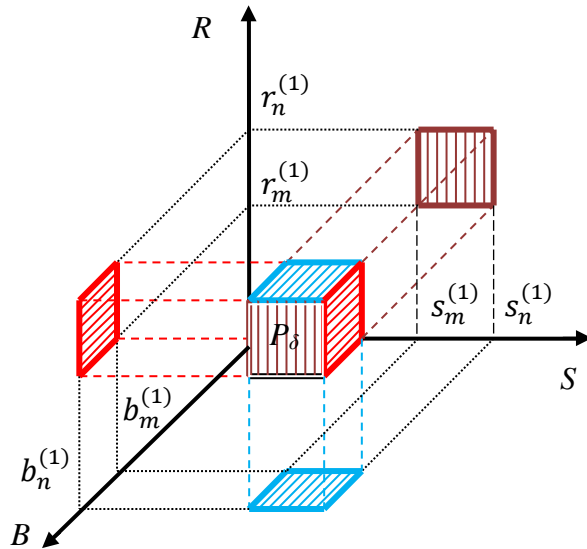


Рис. 2. Схема представления множества вариантов реализуемых возможностей P_δ

На рис. 3 выделена область множества $P\Delta \subset P\delta$ при фиксированной обстановке $s_j^a = \text{const}$.

$$\sum \Delta p = / \{ r_i \} \cdot / \{ b_k \} / \Rightarrow \{ \omega_n \}_N \Rightarrow p = \omega_1.$$

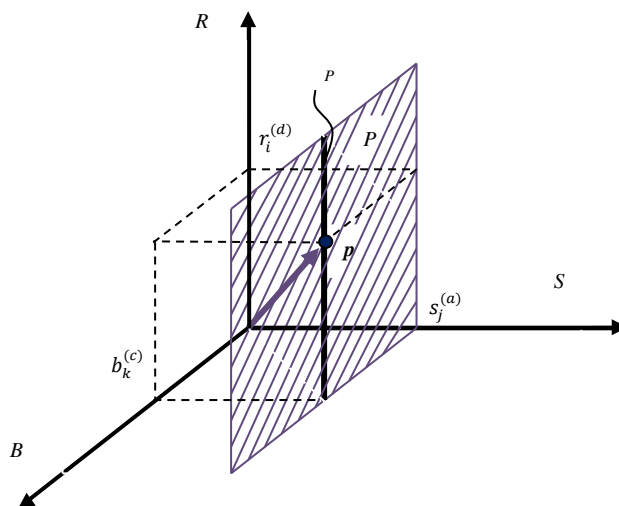


Рис. 3. Схема множества вариантов реализуемых возможностей $P\Delta$ при $s_j^a = \text{const}$

При фиксированной обстановке ($s^{(a)} = \text{const}$) возможности (ω) своих сил будут характеризоваться только соотношением сил (в том числе присущими им возможностями применения) сторон $P\Delta \subseteq R \times B$, а при фиксированном значении состава сил противника $- (b^{(c)} = \text{const})$, $P\Delta \rightarrow \{ p \} \subseteq P_l \subseteq R$ (частный вариант) – функциональная зависимость $p = f(r)$.

В случае, когда есть информация о значении каждого $p \in P$ и $p = \langle r, b, s \rangle$, для каждого состава сил противника b_k в условиях обстановки s_j можно определить для командира состав его сил r_i с целью решения поставленной перед командиром задачи.

В то же время, чем больше у командира опыт (знаний о возможностях) применения своих сил в схожих условиях, тем прогноз решения задачи точнее. Обладая к моменту принятия решения сведениями о своих силах, силах противника и условиях выполнения задачи, оператор органа тактического звена управления может соотнести их с имеющимися (или аналогичными) данными обстановки в созданной базе данных, а затем на множестве $P = \{ \langle r, b, s \rangle \}$ возможных вариантов решения командира выделить подмножество наиболее вероятных вариантов и выбрать наилучший из них вариант $p^* \in P$ [6–8]. Пример получаемых вариантов соотношения сил сторон ω_z , где $z = \overline{1, Z}$ и их оценка $\omega_z(p_z)$ формируется на основе формализованного представления сил сторон, представлен в табл. 1.

Таблица 1

Матрица возможных вариантов соотношения сил сторон

№ варианта, z	Состав наряда сил противника, b_{kz}	Состав наряда своих сил, r_{iz}	Возможные условия обстановки, s_{jz}	Вариант сочетания сил сторон, ω_z	Оценка соотношения сил сторон, $\omega_z(p_z)$
1	b_{k1}	r_{i1}	s_{j1}	ω_1	$\omega_1(p_1)$
2	b_{k2}	r_{i2}	s_{j2}	ω_2	$\omega_2(p_2)$
3	b_{k3}	r_{i3}	s_{j3}	ω_3	$\omega_3(p_3)$
...
Z	b_{kZ}	r_{iZ}	s_{jZ}	ω_Z	$\omega_Z(p_Z)$

Командир, не только используя накопленный опыт и интуицию, но и опираясь на полученные результаты вычислений, сможет более обоснованно выбрать вариант решения поставленной задачи применения своих сил в соответствии с имеющимся составом сил противника.

Расширение номенклатуры, поражающих свойств и способов применения средств вооружения существенно ограничивает возможности эмпирической оценки командирами при практических действиях по управлению войсками. Это обстоятельство неизбежно приводит к тому, что существующие методы оценки количественно-качественного соотношения сил сторон (в том числе Осипова – Ланчестера) теряют свои положительные свойства и исследование вариантов применения переносится на сложные математические модели с использованием средств вычислительной техники.

Подобные модели условно можно назвать внешними по отношению к умозрительным моделям. Результаты исследований на *внешней модели* представляют собой всего лишь исходные данные для исследований на умозрительной модели, поскольку именно в последнем случае окончательно формируется главный результат – решение командира. Однако обоснованность этого решения будет всецело (в силу отсутствия практического опыта) определяться качеством моделирования. Вместе с тем результаты исследований на основе внешних моделей позволяют получать недостающие сведения о применении противником новых средств вооружения (нет в нашей базе информации об их применении в реальной обстановке). Результат достигается за счет возможности командира получать и обрабатывать исходные дан-

ные, сосредоточенные в базе данных, и получать на основе вычислений результаты моделирования.

Обоснованность решения на применение своих сил определяется личностными показателями командира, его глубиной разносторонних оперативно-тактических расчетов, сведенных в базу данных с целью оценивания возможностей сил сторон. В случае недостаточного количества в распоряжении командира того или иного вида вооружения, материальных средств обеспечения и т. п., опираясь на полученные результаты моделирования, он сможет с помощью маневра силами и средствами решить поставленную задачу. Четко сущность подобных возможностей выразил русский военный теоретик Г. А. Леер: «Стремиться к тому, чтобы быть сильным в том, в чем противник слаб – подставлять сильную сторону и уклонять слабую» [9].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный в статье методический подход позволяет сделать следующие основные выводы:

1. Результаты вычислений с использованием внешних моделей позволяют своевременно получить недостающую информацию (прогноз) о применении сил противника с новыми средствами вооружений. Эффект достигается за счет возможности обрабатывать получаемую в реальном масштабе времени информацию о противнике, размещать ее в базе данных и на основе вычислений оперативно получать результаты.

2. Обоснованность решения командира на применение своих сил определяется глубиной разносторонних оперативно-тактических расчетов, сведенных в базу данных с целью оценивания именно возможностей применяемых воинских формирований, содержанием которых является не только анализ соотношения сил сторон, но и учет морально-психологического состояния сил, уровня их обученности и слаженности.

3. На первый взгляд, реализуемый методический подход может показаться несколько громоздкой процедурой, требующей значительных затрат времени при ручном подсчете. Однако, если использовать возможности электронно-вычислительной техники, причем известные исходные данные вводить и уточнять заблаговременно (по результатам реального боевого опыта своих сил и сил противника по мере получения итоговых боевых донесений), то расчеты по результатам поступления текущей информации о соотношении сил сторон можно корректировать своевременно.

4. Применение автоматизации позволит увеличить оперативность принятия решений и доведения команд до подчиненных.

Список используемых источников

1. *Котов А. В., Зайцев В. Н.* О развитии систем поддержки принятия решений в интересах организации боевых действий // Вестник АВН. – 2022. – № 4. – С. 37–46.

2. *Меркулов С. Н., Сухоруков Ю. С., Донсков Ю. Е.* Проблемы автоматизации интеллектуальной поддержки принятия решений общевойсковыми командирами в тактическом звене // Военная мысль. – 2009. – № 9. – С. 43–53.

3. *Буравлев А. И., Горшков П. С.* К вопросу о построении агрегированной модели противоборства группировок войск // Вооружение и экономика. – 2017. – № 5(42). – С. 35–48.

4. *Поленин В. И., Сущенко Д. А.* Разработка модели вооруженного противоборства боевых систем тактического уровня с нанесением ударов непосредственно по боевой системе противника и отражением ударов противника по своей боевой системе // Национальная ассоциация ученых. – 2015. – № 8(17). – С. 167–171.

5. *Морозов Н. А.* Теоретические основы качественного анализа больших военных систем : моногр. – М. : М-во обороны, 2003 – 221 с.
6. Военная системотехника и системный анализ : учебник / А. Н. Павлов [и др.]; под общ. ред. А. Н. Павлова. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2010. – 251 с.
7. *Митюков Н. В.* Имитационное моделирование в военной истории. – М. : ЛЕНАНД, 2018. – 280 с.
8. *Вайнер А. Я.* Тактические расчеты. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Воениздат, 1982. – 148 с.
9. *Леер Г. А.* Метод военных наук. – СПб., 1984. – 386 с.

В. А. Новиков,
доктор военных наук, профессор;
К. Б. Салтыков,
кандидат военных наук,
Д. В. Толстов

ПОДХОД К ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Представлен подход к решению задачи повышения эффективности управления сложными организационно-техническими системами за счет оптимизации информационных потоков в контуре управления. Предложена модель формализованного описания информационного потока в контуре управления, основой которой является информационная модель матричного вида. Раскрыта процедура проведения анализа и оптимизации информационных потоков на базе метода графов и транспортной задачи линейного программирования.

Ключевые слова: система управления, поток информации, информационная модель, оптимизация.

ВВЕДЕНИЕ

Происходящие в настоящее время качественные перемены в развитии средств вооруженной борьбы существенно усложнили работу по управлению организационно-техническими системами военного назначения (ОТС ВН) и потребовали от органов управления умения решать возложенные на них задачи в условиях жесткого лимита времени. В связи с этим возникает острая необходимость ускорения процесса обработки потоков информации, а также рационального сокращения их объемов.

Следует отметить, что одним из основных элементов потока информации как в автоматизированных, так и в неавтоматизированных системах управления сложными организационно-техническими системами являются документы. При этом практика войск показывает, что документы целесообразно разрабатывать (оформлять) только в тех случаях, когда именно такое представление информации продиктовано служебной необходимостью и данный документ нельзя заменить другими видами информационного воздействия.

Проведенные исследования свидетельствуют, что основных причин возрастания объемов документов в системе управления ОТС ВН можно указать две [1]:

- 1) *объективную* – обусловленную масштабами, сложностью, динамичностью процессов управления, глобальностью применения ОТС ВН;
- 2) *субъективную* – зависящую от форм и способов реализации функций управления должностными лицами органов управления.

Последняя тесно связана с наличием скрытых резервов по сокращению номенклатуры документов и оптимизации их объема. Исследование возможности оптимизации объема документов в системе управления подразумевает решение следующих частных задач:

- создания модели, описывающей информационные процессы в системе управления ОТС ВН;
- анализа потоков информации, циркулирующих в реальных системах управления ОТС ВН;
- обоснования необходимого и достаточного количества документов, сопровождающих процесс управления ОТС ВН.

В данной статье авторами предлагается методический инструмент для решения задачи оптимизации потоков информации (объема информации, содержащейся в документах) в целях повышения эффективности функционирования системы управления ОТС ВН.

МОДЕЛЬ ОПИСАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Для решения задачи исследования потоков информации в системе управления ОТС ВН необходима адекватная информационная модель, основу которой должны составлять элементы организационной структуры системы управления ОТС ВН; перечень информации, циркулирующей между элементами; характеристики потоков информации; перечень процедур ее обработки. При этом документ должен являться стержнем информационной модели, поскольку с его помощью осуществляются передача и движение сообщений и данных между пунктами управления, а также между подразделениями органа управления, реализующего функции и задачи управления [2].

Исходя из цели и задач исследования, авторами предлагается использование *информационно-матричной модели*. Такая модель – это совокупность матриц, отражающих взаимосвязь органов управления (далее – ОУ) посредством передачи информации (документов и данных) (рис. 1). Функциональное назначение каждой матрицы данной информационно-матричной модели системы управления ОТС ВН подробно раскрыто в пособии «Организация информационных процессов в системе управления войсками» [3], а их информационное содержание представлено на рис. 2–4.

Блок исходных данных	А признаки данных	1. Матрица формирования и внутреннего использования документов органом управления	2. Матрица передачи и использования документов в подчинённых органах управления	Блок обобщенных данных
	Б признаки документов	3. Матрица получения и использования документов из подчиненных органов управления	4. Матрица информационного взаимодействия органов управления	

Рис. 1. Информационно-матричная модель системы управления ОТС ВН

Кратко охарактеризуем каждую из четырех матриц.

Матрица № 1 характеризует формирование всех документов в исследуемом ОУ и степень их использования при разработке других документов в этом ОУ.

Матрица № 2 характеризует информационную взаимосвязь (прямую связь) исследуемого ОУ с подчиненными ОУ (отражает передачу разработанных документов в другие ОУ).

Матрица № 3 характеризует информационное взаимодействие (обратную связь) исследуемого ОУ и подчиненных ОУ (отражает документы, поступающие из подчиненных ОУ, а также степень их использования).

В матрице № 4 содержание строк совпадает с матрицей № 3, а столбцов – с матрицей № 2. Итоговые результаты данной матрицы характеризуют: по столбцам – степень использования поступающих документов; по строкам – количество документов, переданных в другие ОУ. То есть в указанной матрице отражаются документы, данные которых использованы в работе, а сам документ передан в другой ОУ. Стоит отметить, что такую информационно-матричную модель необходимо строить отдельно для каждого ОУ исследуемой системы управления ОТС ВН или для системы в целом.

документы, разрабатываемые в исследуемом органе управления

	Д ₁	Д ₂	Д ₃	Д ₄	...	Д _n	
Д ₁		1	1		...	1	4
Д ₂			1	1	...		3
Д ₃				1	...		2
Д ₄					...	1	2
...	...	...	...	...	...	...	n
Д _n					...		
		1	2	2	n	2	

документы, разрабатываемые в исследуемом органе управления

Рис. 2. Информационное содержание матрицы № 1

подчиненные органы управления

	ОУ ₁	ОУ ₂	ОУ ₃	ОУ ₄	...	ОУ _i	
Д ₁	1	1	1	1	...	1	5
Д ₂		1	1	1	...		3
Д ₃				1	...	1	2
Д ₄					...	1	1
...	...	...	...	...	...	...	i
Д _n		1		1	...	1	3
		3	2	4	n	4	

документы, передаваемые в подчиненные органы управления

Рис. 3. Информационное содержание матрицы № 2

документы, разрабатываемые в исследуемом органе управления

	Д ₁	Д ₂	Д ₃	Д ₄	...	Д _n	
Д' ₁	1		1	1			3
Д' ₂		1	1	1			3
Д' ₃				1			1
Д' ₄						1	1
...							N
Д' _n						1	1
	1	1	2	3	n	2	

документы, поступающие из подчиненных органов управления

Рис. 4. Информационное содержание матрицы № 3

Таким образом, предложенная информационно-матричная модель позволяет достаточно точно отразить документооборот в системе управления ОТС ВН, изучить и проанализиро-

вать наиболее существенные стороны процесса сбора, обработки и передачи информации. Возможность рассмотреть отдельные этапы этого процесса, начиная с получения исходных данных и заканчивая разработкой документа, является преимуществом данного подхода к представлению информационных потоков.

АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПОТОКОВ ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Весь комплекс процедуры анализа при решении задачи оптимизации потоков информации реальных систем управления ОТС ВН позволяет реализовать подход с использованием метода графов. В этом случае поток информации в системе управления ОТС ВН отражен в виде информационного графа, вершинами которого являются пункты (органы) управления, а циркулирующая информация между ними отражена дугами (рис. 5).

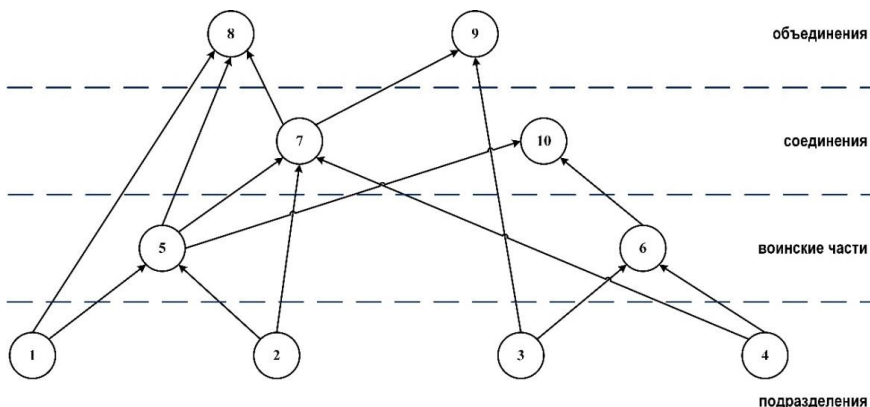


Рис. 5. Информационный граф системы управления ОТС ВН

Для информационного графа строится матрица смежности (рис. 6). Матрица смежности является компактной моделью информационного графа. В дальнейшем строится последовательность матриц, представляющих собой матрицу смежности, возведенную во вторую, третью степень и т. д. Общее количество матриц равно порядку информационного графа [4].

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Σ
1					1			1			2
2					1		1				2
3						1			1		2
4						1	1				2
5							1	1		1	3
6										1	1
7								1	1		2
8											0
9											0
10											0
Σ	0	0	0	0	2	2	3	3	2	2	

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1					1		1	3	1	1	
2					1		2	3	2	1	
3						1			1	1	
4						1	1	1	1	1	
5							1	2	1	1	
6										1	
7								1	1	1	
8											
9											
10											

Рис. 6. Матрица смежности A и сводная Ψ -матрица

Объединение полученных матриц в одну сводную Ψ -матрицу позволяет провести анализ числа возможных путей поступления информации от каждого из элементов системы.

Полученная Ψ -матрица и последовательность матриц по степеням позволяют выявить ряд существенных свойств потока информации в рассматриваемой системе управления, таких как направленность потока информации, количество тактов передачи информации, динамику обобщения и использования информации каждым элементом системы.

Собранные в таблицы данные позволяют решить задачу оптимизации информационных потоков, используя транспортную модель линейного программирования (рис. 7) [5].

Рассмотренный подход обеспечивает описание потоков информации между элементами системы управления ОТС ВН в формализованном виде, а также позволяет организовать сбор данных в стандартные таблицы, что делает возможным его применение в существующих комплексах средств автоматизации на базе локальных вычислительных сетей персональных ЭВМ.

ПУ	P_1	...	P_j	...	P_m	Выдаваемая информация
P_1	C_{11} X_{11}	...	C_{1j} X_{1j}	...	C_{1m} X_{1m}	a_1
...
P_i	C_{i1} X_{i1}	...	C_{ij} X_{ij}	...	C_{im} X_{im}	a_i
...
P_n	C_{n1} X_{n1}	...	C_{nj} X_{nj}	...	C_{nm} X_{nm}	a_n
Получаемая информация	b_1	...	b_j	...	b_m	$\sum a_i = \sum b_j$

Рис. 7. Таблица представления матрицы транспортной модели

В таблице матрицы транспортной модели использованы следующие обозначения:

C_{ij} – суммарная кратность передачи всей информации из i -го пункта управления (органа управления);

X_{ij} – соответствующее число видов информации (документов);

a_i – информация, выдаваемая подчиненным пунктом управления;

b_j – информация, получаемая вышестоящим пунктом управления.

С использованием данной модели возможна оптимизация информационных потоков. В математической форме она представляется в следующем виде:

$$Z_o = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m C_{ij} \cdot X_{ij}, \tag{1}$$

при условии, что

$$\sum_{j=1}^m X_{ij} = a_i, \tag{2}$$

$$\sum_{i=1}^m X_{ij} = b_j, \quad (3)$$

$$X_{ij} \geq 0 \quad (i = j = 1, 2, \dots, m). \quad (4)$$

Выполнение первого условия (2) обеспечивает полную передачу всей информации из всех элементов системы управления войсками нижнего уровня (подчиненные пункты управления); второе условие (3) является следствием получения всей информации от элементов системы управления войсками высшего уровня (органом, получающим информацию). Условие (4) указывает, что передача информации из нижестоящих в вышестоящие пункты управления и наоборот всегда больше «нуля».

Целевая функция (1) представляет собой суммарную кратность передачи информации. Решение задачи сводится к минимизации выражения (1) при ограничениях – (2), (3) и (4). Этот оптимум обеспечивает эффективное функционирование системы. Оптимальным считается такое протекание информационных процессов, при котором информация состояния (доклады, донесения) минимальна, а командная (распоряжения, приказы) – максимальна.

РЕЗУЛЬТАТЫ АПРОБАЦИИ ПОДХОДА К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ПОТОКОВ ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ

Предложенный подход к решению задачи оптимизации потоков информации в системе управления ОТС ВН был апробирован в ходе проведения практики в управлении воинскими формированиями (командно-штабная военная игра), в рамках реализации основной профессиональной образовательной программы высшего образования – программы магистратуры по направлению подготовки «Управление воинскими частями и соединениями».

Для исследования использованы директивно-информационные документы, разрабатываемые руководством командно-штабной военной игрой при подготовке к игре, и комплект учебно-боевых документов, разрабатываемых обучающимися непосредственно в ходе игры.

Процесс анализа текстовых документов осуществлялся в соответствии со следующими этапами (рис. 8).

Этап 1. На первом этапе осуществлялось формирование групп документов по классификационным признакам (приказ, распоряжение и т. д.).

Этап 2. Следующим действием являлась кластеризация массивов информации, содержащейся в обрабатываемых документах. Необходимость процедуры обусловлена трудоемкостью обработки больших массивов информации (вычисление «больших» матриц) [6].

Этап 3. Преобразование документов к виду, который обеспечит применение методов «разбора текста». Основное содержание этапа – удаление «вспомогательных» слов.

Этап 4. На данном этапе из выбранных документов извлекались «ключевые» понятия, которые в дальнейшем анализировались.

Этап 5. Задача данного этапа – извлечение шаблонов и отношений, имеющих в текстах. Этот этап в процессе анализа текстов являлся основным.

Этап 6. Завершающий этап процесса анализа текстовых документов предполагает интерпретацию полученных результатов (графическая или табличная визуализация).

Результаты апробации предложенного подхода показали, что объем документов можно существенно сократить без потери полноты и качества информации, необходимой для эффективного решения задачи управления ОТС ВН (рис. 9).

Таким образом, решение оптимизационной задачи с использованием предложенного подхода позволяет рационально сократить номенклатуру документов и объем их внутренней информации, что, в свою очередь, обеспечит сокращение времени на их разработку и обработку должностными лицами органов (пунктов) управления.



Рис. 8. Этапы процесса анализа текстовых документов

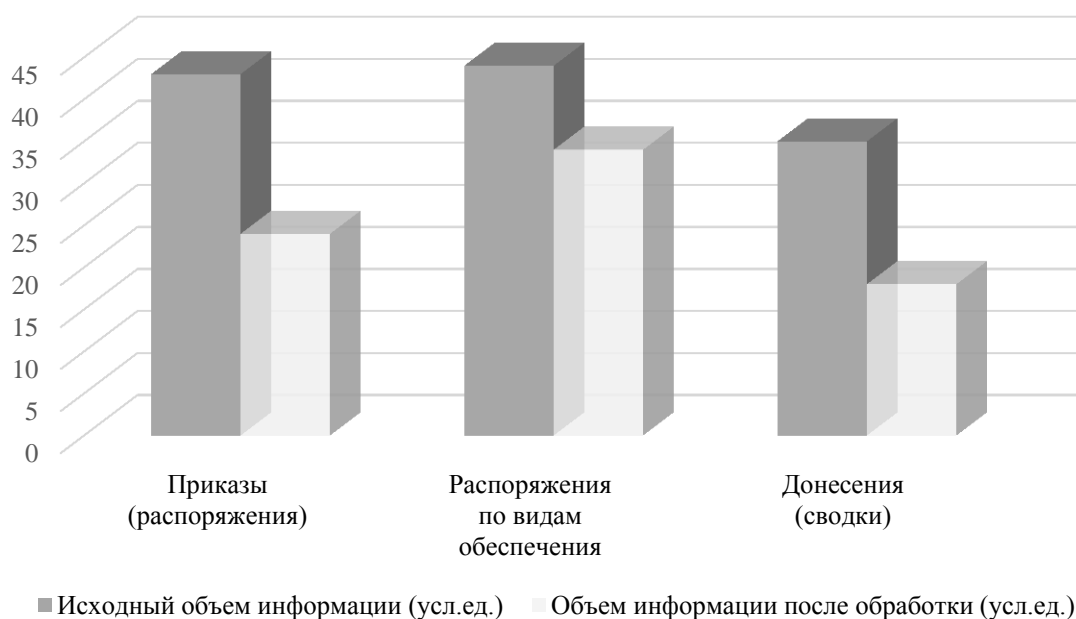


Рис. 9. Результаты апробации подхода к решению задачи оптимизации потоков информации в системе управления

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Следует отметить, что оптимизация информационных процессов является одной из основ научного управления ОТС ВН. Предложенная модель и подход к оптимизации потоков информации в системе управления ОТС ВН обеспечивают:

- выражение процесса формирования и движения информации (документов) в наглядной форме;
- отражение в единообразной форме информационных потоков, сопровождающих деятельность органов управления;
- возможность обоснованно определять необходимое и достаточное количество документов (их объем), сопровождающих процесс управления.

Таким образом, предложенный подход является методическим инструментом для решения задачи оптимизации информационных процессов в системе управления ОТС ВН, который может быть внедрен в автоматические системы управления войсками. Внедрение в эти системы предложенного подхода существенно снизит нагрузку на их подсистему хранения данных и повысит оперативность поиска рационального решения при управлении ОТС ВН.

Список используемых источников

1. *Мингалева В. С.* Общие закономерности и тенденции документообразования в социально-экономических системах управления. – М. : МГИАИ, 1983. – 83 с.
2. *Основы теории управления войсками / П. К. Алтухов [и др.].* – М. : Воениздат, 1984. – 221 с.
3. *Пухляк А. Н.* Организация информационных процессов в системе управления войсками. – М. : ВА РВСН, 1987. – 99 с.
4. *Овчинников В. А.* Графы в задачах анализа и синтеза структур сложных систем. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 423 с.
5. *Белотелов Н. В., Бродский Ю. И., Павловский Ю. Н.* Сложность. Математическое моделирование. Гуманитарный анализ: исследование исторических, военных, социально-экономических и политических процессов. – М. : Либроком, 2009. – 320 с.
6. *Анализ данных и процессов : учеб. пособие / А. А. Барсегян [и др.].* – 3-е изд., перераб. и доп. – СПб. : БХВ-Петербург, 2009. – 512 с.

Avksentyev A. A., Kolpin M. A. Modeling space vehicles movement with forecasting onboard and modeling real parameters method // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 688. – P. 6–13.

Modeling space vehicles movement with forecasting onboard and modeling real parameters method is offered. The traditional method of modeling uses only modeling real parameters forecasting which precisely describe movement to which measuring devices react. By means of measuring devices true parameters are transforming to the results of measurements used both for corrections of predicted onboard parameters, and as onboard parameters. Onboard parameters are known and can be applied in control algorithms. The difference between offered and traditional methods parameters at identical entry conditions is calculated. The application area of the offered method is founded.

Key words: spacecraft, true parameter, measuring device, measurement result, onboard parameter.

Bulekbaeva M. Y., Goncharov P. S., Zozulya L. P. Method determining of parameters of non-cooperating approaches between circular non-coplanar orbits // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 688. – P. 14–21.

A method is presented for the numerical-analytical determination of the separation time of an object from the KA1 spacecraft located initial orbit to implement a non-cooperative rendezvous with the KA2 spacecraft located in the target orbit. Orbits KA1 and KA2 are non-coplanar. The parameters of the transfer orbit and the flight time are found as functions of the anomaly and the time at which the spacecraft are at the minimum distance from each other. The interception is carried out by a single impulse applied at a starting point at the initial orbit.

Key words: single-impulse interception, non-coplanar orbits, time interval, spacecraft.

Voznyuk V. V., Kopalov Y. N., Fomin A. V. Investigation of the noise immunity of a receiving signals with orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM) under the influence of internal noise and external interference with angular modulation // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 688. – P. 22–31.

The results of a study of the noise immunity of receiving signals with OFDM against the background of unintentional interference with angular modulation obtained using a simulation model of a communication channel are presented. The dependences of the average error probability per channel and information bit when receiving signals with OFDM on the width of the spectrum and the index of angular modulation of interference against the background of jointly acting internal noise and external interference with angular modulation are obtained.

Key words: OFDM, noise immunity, interference with angular modulation.

Abasheva I. V. Classification of the emotional content of a mixed code text // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 688. – P. 32–40.

The article deals with the problem of class imbalance, which is one of the important issues in evaluating the emotional content of texts with a mixed code. A classification of the emotional content of a text with a mixed code is proposed using an approach based on the Levenshtein distance. The characteristics of different approaches to machine learning are compared.

Key words: mixed code text messages, emotional analysis, emotional analysis, machine learning learning.

Shemelov V. A., Efremenko A. N., Roslov L. D. A study of the suitability of reanalysis data for use instead of radiosonde data // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 688. – P. 41–53.

This article presents the results of an evaluation of the suitability of reanalysis data for use instead of radiosonde observations data. The calculations were performed in the integrated development environment R Studio with the R programming language which was used for statistical tests of the hypotheses of equality of the basic numerical characteristics of air temperature, geopotential height, wind direction and speed in a free atmosphere according to reanalysis data and radiosonde observations data with different averaging periods.

Key words: reanalysis data, radiosonde observations data, numerical characteristics, hypothesis testing methods, criteria.

Biryukov D. N., Lebedev S. L., Russu V. Y. Automation of the search for vulnerabilities in the firmware of telecommunication devices under conditions of aprior uncertainty // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 688. – P. 64–59.

An approach to automating the search for vulnerabilities in the software of telecommunications equipment based on machine learning methods is considered. The collection of test programs for the formation of a training sample, their classification, compilation for the ARM and MIPS architectures, conversion into an intermediate byte code LLVM IR.

Key words: information protection, vulnerability search automation, firmware unpacking automation, information security.

Lomako A. G., Menisov A. B., Timashov P. V. Method of The Detection Datasets Leak Based On Digital Watermark Technology // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 688. – P. 60–70.

The huge amount of training data and available computing power have become a key factor in the success of artificial intelligence technologies. However, there are concerns about the unauthorized use of datasets for commercial and other purposes. This article presents a backdoor-based digital watermarking method to protect datasets from leakage and unauthorized use. By inserting a small number of digitally watermarked samples into the dataset, it is possible to identify third-party machine learning models illegally trained on the dataset. The conducted experiments with graphical and textual datasets demonstrate that the developed method effectively labels datasets with minimal impact on the initial performance of machine learning models.

Key words: protection of intellectual property; dataset; backdoor insertion; watermark.

Antropova A. V., Kozlov V. V., Stelmakh S. F. Methodology for the formation of indicators of the technical condition of the electromechanical drive of the supporting system of small spacecraft // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 688. – P. 71–79.

To solve the problem of multiparametric dimension when evaluating the operability of technical objects, it is necessary to develop convolutions of these parameters into a set of defining parameters. A desirable stage in the formation of indicators of the technical condition of the objects under study is to obtain an expression for determining the set of defining parameters. As a method for identifying the determining parameters, it is advisable to use morphological analysis.

Key words: electromechanical drive, small spacecraft, simulation, modeling, mechanism.

Basotin E. V., Loktionov V. M., Shcherbina I. S. The model of conflict situations arising in the process of functioning of organizational and technical systems // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 688. – P. 80–86.

The article considers a simulation model that allows to estimate the reliability and time characteristics of the rocket and space complexes during the preparation processes execution. The proposed model can also be used to simulation the conflicting situation (i.e. parallel processes, time delay and failure aftereffects). In future, the results can be used to evaluate the operation system efficiency and as the decision support system elements of the ground measurement facilities.

Key words: state of the organizational and technical system, simulation model, conflict situation.

Simulation modeling of ground-based space infrastructure facilities operation system functioning as a tool for justification of maintenance parameters / R. M. Vivchar, E. N. Esipov, A. S. Kokarev, D. V. Reshetnikov // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 688. – P. 87–98.

The article reveals a problematic situation consisting in the presence of a tendency to exceed the time standards of technological operations at the ground-based space infrastructure facilities providing spacecraft launches, regulated in the operational and technical documentation.

One of the approaches to solving the identified problem by means of substantiating the parameters of technical maintenance of constituent parts of ground-based space infrastructure objects using an agent-based simulation model of their operation system functioning is proposed. The developed model is characterized by the use of nuclear probability density estimation (Gaussian nuclear function) to find the probability of achieving a set of objectives of the operation system functioning, allows to determine the relationship between the performance indicators of the operation system and the parameters of the maintenance system (volume, frequency and cost).

Key words: operation system, maintenance system, ground-based space infrastructure, simulation model.

Voronin A. E., Peshekhonov N. E., Poryadin D. I. Optimization of the structure of the power supply system based on the application of the modified simplex method // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 688. – P. 99–104.

The possibility of using the simplex method for an objective function whose coefficients depend on the value of a variable is considered. A methodological approach to solving a problem with a nonlinear objective function using the simplex method is proposed, which can be applied in conditions when the laws of change of change of the coefficients of the objective function are known.

Key words: simplex method, objective function, optimization problem.

Gerasimenko S. Y., Nizovtsev V. M., Petukhov A. I. Method of numerical calculation of the processes of flow of profiled elements of the structure of heat exchange devices and cooling systems aircraft engines by the flow of a viscous incompressible fluid // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 688. – P. 105-111.

The flow of a viscous incompressible fluid around the profiled surfaces of structural elements of gas turbine engine (GTE) cooling systems and heat exchange devices of aircraft systems is considered. Integration of the equations of motion of a viscous fluid - the Navier-Stokes equations - is carried out using a numerical finite-difference method. A computational and theoretical study of the influence of fluid flow parameters on the distribution of pressure and friction along the surface of the profile and on the change in velocity in the flow was carried out. It has been established that under these conditions, when flowing around a pointed edge of a profiled surface, the stagnation pressure of the fluid flow decreases several times. This leads to a decrease in pressure resistance and total resistance, as well as to a decrease in hydraulic resistance in channels with developed heat exchange surfaces in aircraft and gas turbine engines systems. An economical technique for numerical calculation of the processes of flow of a viscous incompressible fluid around profiled

surfaces with a curvilinear generatrix has been developed. It is shown that thanks to the use of profiles with a sharpened leading edge, the power consumption of the power plant (PU) and the aircraft gas turbine engine for pumping coolant (coolant) can be significantly reduced.

Key words: gas turbine engine, profiled surface, aircraft, viscous fluid flow, computational and theoretical numerical study.

Gorshkov L. K., Lebedev E. L., Rumyantsev K. V. Model of stress-strain state in plastic flowing components of damping devices // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 688. – P. 112–119.

In this work presented a model of stress-strain state in plastic flowing components of damping devices. It was considered a damper consisting sleeve and mandrel. It was shown forces, which affects on the damper while its functioning and dependencies of the forces to parameters of it.

Key words: damper, plastic flowing, toughness, tension.

Dorozhko I. V., Kopeika A. L., Kopeika E. A. Methodological approach to assessing the reliability of multistage control of the technical condition of objects based on dynamic bayesian trust networks // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 688. – P. 120–129.

A methodology has been developed for constructing a model for estimating the probabilities of the types of technical condition of an object upon receipt of control results, taking into account the times of receipt of control results, as well as the dynamics of the technical condition associated with a priori information about the reliability of the object. Recommendations are made to take into account the model in the duration and frequency of monitoring. To develop the model, the apparatus of Bayesian networks was used, which makes it possible to simplify and formalize the process of determining, analyzing and predicting the technical condition of objects, taking into account the results of multi-stage control.

Key words: testing, technical condition monitoring, reliability, errors of the first and second kind, model, complex technical systems, Bayesian confidence network, control system.

Ilyin A. V., Karagodin V. V., Rybakov D. V. Mathematical models of the distribution network for the study of its modes of operation // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 688. – P. 130–139 .

The processes of modernization of power supply systems for military infrastructure facilities should be carried out using advanced energy-efficient technologies that involve the use of digital automation devices, the software algorithms of which should be tested on models of power systems. Under these conditions, the role of mathematical modeling especially increases. The article considers the possibilities of obtaining and using various mathematical models in the MatLab mathematical package for the study of distribution electrical networks, which form the basis of power supply systems for various objects.

Key words: power supply systems, electrical distribution networks, mathematical modeling, model, equivalent circuit, transfer functions, state variables.

Karagodin V. V., Revyakov B. A., Rybakov D. V. Substation of the need to transfer distribution electrical networks of special objects to a voltage of 20 kV // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 688. – P. 140–145.

The article substantiates the need to transfer the distribution electrical networks of special objects of the Space Forces from a voltage of 6, 10 kV to a voltage of 20 kV. Comparative analysis calculations are given. The main advantages of distribution electrical networks with a voltage of 20 kV are shown, namely, an increase in the capacity of distribution electrical networks, a reduction in power and energy losses for its transportation, an expansion of the zone of possible placement of

consumer transformer substations, ensuring the maximum distance of a special object from a power source, thereby thereby increasing the survivability of RES and the reliability of their operation.

Key words: electrical distribution network, voltage, cable transmission lines, power losses.

Methodology for feasibility of time limits for the use of returned stages of tandem rockets / K. A. Krupsky, E. A. Prokopenko, S. G. Khlebnikov, V. A. Chernyavskiy // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 688. – P. 146–155.

The transition to space-based rockets comprising the return stages of the launch vehicle would reduce the cost of producing those stages on the one hand and, on the other, there would be a need for additional technological operations related to the post-launch survey of the nodes of the return stage. Thus, a situation arises in which it is necessary to conduct a technical and economic analysis of the process of using the returned stages instead of the traditional schemes. This article presents a feasibility study methodology for the use of returned stages of space missiles, taking into account their operational life according to the minimum cost criterion. The developed technique makes it possible to justify the deadlines for the use of the tandem scheme for space missiles, but can also be finalized for the package layout of the stages of the launch vehicle. The results of the calculation of the cost of putting one kilogram of payload into the target orbit (using the first-degree rescue system and without it) made it possible to substantiate the ultimate life of the returned stages.

Key words: feasibility study, space rocket, return stage.

Loktionov V. M., Shcherbina I. S. Evaluation of the state of the organizational and technical system of military purpose based on experimental data on the basis of logical-probabilistic modeling // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 688. – P. 156–164.

The article describes an approach of classifying the states of an organizational and technical system for military purposes using experimental data obtained during its operation, which makes possible the decision maker providing with the necessary information for making a managerial decision. A feature of this approach is the joint use in the process of classification of heterogeneous data on the organizational and technical system, obtained by measuring and expert methods, and the implementation of discriminant rules using the functions of the algebra of logic and the construction of minimal paths and sections.

Key words: organizational and technical system, experimental data, evaluation, decision making, logical-probabilistic model.

Prediction of the potential energy influx for a spacecraft equipped with a solar array with one degree of freedom / A. V. Nemirov, N. V. Radionov, A. A. Skoptsov, A. V. Yanguzov // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 688. – P. 165–174.

The article presents a method for predicting the energy inflow from solar panels of the onboard power supply system of a spacecraft for conditions when restrictions on the rotation of solar panels do not allow the most efficient conversion of solar radiation energy. A solution is proposed for the problem of optimal rotation of solar panels relative to the spacecraft body, which provides the best conditions for the operation of photoelectric converters. It is shown that the optimal control of the position of solar panels can increase the electrical power generated by them and the amount of electricity generated in various illumination conditions.

Key words: spacecraft, onboard power supply system, power supply, solar battery orientation system, photoelectric converter.

Petukhov A. I., Sultanov A. E. Use of multi-model approach for simulation of longitudinal auto-oscillations // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 688. – P. 175–182.

The analysis of various approaches to modeling of longitudinal vibrations to the bodies of launch vehicles at the stage of spacecraft launch is carried out. The positive aspects of the approaches are noted, as well as their limitations in relation to the study of self-oscillating processes. The approach of using an integrated multi-model approach to the formation of mathematical models of complex self-oscillatory systems with essentially non-stationary parameters, which include launch vehicles under flight conditions, is substantiated. A high degree of convergence of the considered methods of mathematical modeling is shown on a basic example.

Key words: longitudinal vibrations, modeling, verification.

Polozov G. P., Popov A. M., Shmelev V. V. Methods of diagnosing a technical system under conditions of a priori uncertainty // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 688. – P. 183–198.

The scientific and methodological apparatus for identifying the state of technical systems under conditions of a priori uncertainty of their testing and application conditions is presented. The device includes a set-theoretic model of the object and the state recognition process based on a consistent method of monitoring the technical condition and diagnosing complex systems. The novelty of the proposed material is to take into account the limited capabilities of measuring instruments, as well as the development of a procedure for obtaining a quantitative assessment of the completeness of information, on the basis of which a decision is made about the state of the observed technical system.

Key words: technical system, identification, control, diagnostics, measurement information.

Vazhenin Y. A., Novikov D. A., Chernov D. V. Model of organization of physical training of students of educational organizations of higher education of aerospace forces during practice // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 688. – P. 199–204.

The article presents the results of preliminary studies on the need for physical training of students of an educational organization of higher education during internships and practices, an experimental model of organizing independent physical training is presented, including a monitoring block, a content block, management and result blocks. The proposed model is implemented in a computer program, and allows to take into account a number of key indicators when building the training process: the initial level of physical fitness and the development of physical qualities, indicators of the functional state of students.

Key words: military training, practice, individual task, physical training.

Gledenov V. A., Gula D. N., Mirgorodsky A. N. Analysis of heat consumption in air conditioning systems of special structures in the implementation of energy saving // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 688. – P. 205–210.

The main requirements set forth in the regulations on energy efficiency require the implementation of energy-saving technologies, including in air conditioning systems (SLE). One of the main ways to increase energy efficiency is to reduce heat consumption in the SLE. The article presents an analysis of heat consumption by air heating subsystems in the implementation of energy-saving air technologies.

Key words: air conditioning systems, energy saving, energy efficiency.

Zagrutdinov Y. A., Machnev S. A., Tyurin E. A. Improving the design method of a combined-arms building // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 688. – P. 211–217.

The article considers a method of designing a combined-arms building based on the definition of functional zones and obtaining dependencies for determining the total area of the building. The basis of this method is the systematization of regulatory documents in the field of design and development of rational dependencies in determining the areas of all zones and premises of the building, taking into account the number of military personnel living.

Key words: barracks, room area, military personnel.

Kazakhov B. D., Kaminskiy O. E., Saltykov K. B. Proposals for study of the essence and nomenclature of the indicators of spacecraft launch organizational and technical systems performing designated tasks capabilities // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 688. – P. 218–226.

An approach to assessing the capabilities of the organizational and technical system for launching spacecraft to perform the target function is presented. The nomenclature of the capabilities of the organizational and technical system for launching spacecraft is proposed, taking into account the properties of the system itself and the features of the tasks performed by it. Proposals have been formed for graphical visualization of the capabilities of the organizational and technical system for launching spacecraft to ensure the activities of management bodies at the stage of a comprehensive assessment of the situation and making a rational decision on the organized use of subordinate forces and means.

Key words: system properties, system functioning efficiency, system of indicators, assessment of the capabilities to perform the target function.

Kozlov Y. V., Kukushkin M. A., Ponomarev D. Y. Methodological approach to assessing the quantitative and qualitative ratio of forces of the opposing parties in the tactical control link // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 688. – P. 227–234.

The article proposes an improved mathematical apparatus for assessing the quantitative and qualitative balance of forces of the opposing sides, using a set-theoretic approach to the presentation of data on various military formations of the tactical level. The results of processing the initial information about the quantitative and qualitative ratio of the forces of the opposing sides for the upcoming hostilities using the proposed mathematical apparatus provide the commander with the opportunity to reasonably choose the most acceptable solution from a certain set of feasible (possible) solutions.

Key words: planning of the use of spacecraft controls, performance criteria.

Novikov V. A., Saltykov K. B., Tolstov D. V. An approach to increasing of the efficiency of functioning of the organizational and technical military systems control system // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2023. – Release 688. – P. 235–242.

An approach to solving the problem of increasing the efficiency of management of complex organizational and technical systems by optimizing information flows in the control loop is presented. A model of a formalized description of the information flow in the control loop is proposed, which is based on a matrix-type information model. The procedure for analyzing and optimizing information flows based on the graph method and the linear programming transport problem is disclosed.

Key words: control system, information flow, information model, optimization.

Абашева Ирина Владимировна, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-54, e-mail: vka@mil.ru

Авксентьев Александр Алексеевич, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 237-10-21.

Антропова Александра Владимировна, 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

Басотин Евгений Викторович, кандидат технических 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); тел.: 8 (812) 347-96-87.

Булекбаева Марина Юрьевна, 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

Важенин Юрий Александрович, кандидат педагогических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Вивчарь Роман Михайлович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Вознюк Валерий Васильевич, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-35.

Воронин Алексей Евгеньевич, кандидат технических наук, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Герасименко Сергей Юрьевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Гледенов Владимир Алексеевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-43.

Гончаров Павел Сергеевич, 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

Горшков Лев Капитонович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-89, e-mail: vka@mil.ru

Гула Дмитрий Николаевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-43.

Дорошко Игорь Владимирович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Есипов Евгений Николаевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Ефременко Александр Николаевич, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Загруднинов Юрий Александрович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Зозуля Людмила Петровна, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Ильин Антон Викторович, 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.

Казахов Батраз Джумаевич, доктор военных наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Каминский Олег Эдуардович, кандидат военных наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-43.

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

Козлов Владимир Владимирович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-14, 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).

Кокарев Алексей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Колпин Михаил Александрович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 237-10-21.

Копалов Юрий Николаевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-35.

Копейка Александр Леонидович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Копейка Екатерина Алексеевна, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Крупский Кирилл Анатольевич, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-21, 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).

Лебедев Евгений Леонидович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-11, e-mail: vka@mil.ru

Лебедев Сергей Леонидович, войсковая часть 35565 (119602, Россия, Москва, Мичуринский пр-т, 70); тел.: 8 (495) 541-08-23, e-mail: lebedev244@mail.ru

Локтионов Владимир Михайлович, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

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

Мачнев Сергей Александрович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

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

Миргородский Александр Николаевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-43.

Немиров Алексей Владимирович, 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

Низовцев Владимир Михайлович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Новиков Владимир Александрович, доктор военных наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-42.

Новиков Денис Анатольевич, кандидат педагогических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-07, e-mail: vka@mail.ru

Петухов Антон Иванович, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Пешехонов Николай Егорович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-44, e-mail: vka@mil.ru

Полозов Григорий Петрович, 1 ГИК МО РФ (164170, Россия, Архангельская обл., Мирный).

Пономарев Дмитрий Юрьевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Попов Антон Михайлович, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-65, e-mail: vka@mil.ru

Порядин Даниил Иванович, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); 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

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

Ревяков Борис Александрович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-44, e-mail: vka@mil.ru

Решетников Дмитрий Владимирович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Рослов Леонид Дмитриевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Румянцев Кирилл Владимирович, АО «Корпорация «Стратегические пункты управления», (111024, Россия, Москва, ул. Подъёмная, 12а); тел.: 8 (495) 673-67-01, e-mail: mail@corpsru.ru

Руссу Валерий Юрьевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-87.

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

Салтыков Константин Борисович, кандидат военных наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-94-31.

Скопцов Алексей Андреевич, ФГБУ 27 ЦНИИ МО РФ (125284, Россия, Москва, проезд 1 – Хорошёвский, 5); тел.: 8 (812) 347-95-89.

Стельмах Станислав Феликсович, кандидат военных наук; 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

Султанов Алексей Эдыгарович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Тимашов Павел Васильевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Толстов Денис Владимирович, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-94-31.

Тюрин Евгений Анатольевич, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Фомин Алексей Викторович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-35.

Хлебников Сергей Германович, кандидат военных наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-21, e-mail: vka@mil.ru

Чернов Даниил Викторович, кандидат педагогических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-07, e-mail: vka@mail.ru

Чернявский Владимир Александрович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-21, 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); кандидат технических наук, доцент; e-mail: vka@mil.ru

Шмелев Валентин Валерьевич, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-65, 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).

Янгузов Андрей Валериевич, 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

Авсюкевич Дмитрий Алексеевич, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-44.

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).

Гусев Николай Николаевич, доктор технических 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

Дорохов Вячеслав Леонидович, доктор военных наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-29, e-mail: vka@mil.ru

Еремеев Игорь Юрьевич, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Карагодин Владимир Викторович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Каргу Дмитрий Леонидович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-22, e-mail: vka@mil.ru

Козлов Владимир Владимирович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

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

Косырев Сергей Викторович, доктор военных наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-93.

Крыжановский Владимир Иванович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Лоскутов Андрей Иванович, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Минаков Евгений Петрович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Миронов 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.

Новиков Владимир Александрович, доктор военных наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-42.

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.

Пешехонов Николай Егорович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-44, e-mail: vka@mil.ru

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

Пирогов Сергей Юрьевич, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (964) 334-01-52, e-mail: vka@mil.ru

Радионон 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

Салов Вячеслав Викторович, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-16, e-mail: vka@mil.ru

Стеганов Геннадий Борисович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-22.

Трофимов Илья Анатольевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).