

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

**Выпуск 691
2024 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
доктор воен. 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.; **Е. А. Новиков**, 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.; **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. 24.06.2024.
Формат печатного листа 320×450/2.
Уч.-печ. л. 82,00. Уч.-изд. л. 40,50
Тираж 26 экз. Заказ 4174/104.
Отпечатано в типографии
Военно-космической академии
имени А. Ф. Можайского

СОДЕРЖАНИЕ

СВЯЗЬ, УПРАВЛЕНИЕ, НАВИГАЦИЯ И ВОЕННАЯ РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

- Абазина Е. С., Ерунов А. А., Махмутов А. М., Мишин Д. Ю.* Реализация способа встраивания данных в видеоизображения в процессе аналогово-цифрового преобразования 6
- Благодыренко Е. В., Горбулин В. И., Логунов С. В., Радионов Н. В.* Методика оценивания периодов благоприятных условий наблюдения искусственных космических объектов наземными оптическими средствами 16
- Бурлаков С. О., Драгунов М. Ю., Мишин Д. Ю., Новиков Е. А.* Методика распределения частот спутникового ретранслятора для работы земных станций с парциальными каналами 26
- Вылков А. С., Мелихов А. С.* Обобщенная модель поражения техники связи военного назначения в условиях применения противником обычного оружия .. 32
- Ерохин В. И., Кадочников А. П., Кадочникова Д. С., Пророк В. Я., Сотников С. В.* Метод определения орбиты космического объекта в территориально-распределенной системе наблюдения 42
- Левин Д. В., Паршуткин А. В.* Математическая модель построения инверсно-синтезируемого радиолокационного изображения цели при совместной обработке разнесенных по частоте радиолокационных сигналов 51

СБОР И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

- Борисов А. А., Кулешов Ю. В., Маков А. Б., Новиков Н. С.* Моделирование обстановки в гидрометеорологическом отношении при решении задач оценивания эффективности гидрометеорологического обеспечения 63
- Веселов И. Д., Еремеев И. Ю., Овчаренко Л. А., Семенюк С. С.* Распознавание радиоизлучений средств связи, функционирующих в режиме MIMO-OFDM 71
- Григорьев А. Н., Комраков Д. Н., Коршунов Д. С., Лизан В. М.* Обоснование выбора структуры и параметров проектируемой авиационной системы наблюдения на основе оценивания потенциальной производительности совместной многомаршрутной съемки 84

ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

- Бирюков Д. Н., Дудкин А. С., Родионов Е. С.* Подход к созданию криптозащищенной Mesh-сети 94

Бирюков Д. Н., Захаров О. О., Сабиров Т. Р. Подход к построению системы знаний для решения задач оценивания защищенности информационно-технических систем 102

Бугаев И. А., Данилов В. В. Модель мониторинга DNS-трафика в задачах расследования компьютерных инцидентов, связанных с эксплуатацией вредоносного программного обеспечения 112

Егоров Е. В., Овчаров В. А. Технология пассивной идентификации вредоносного DOS-трафика в задачах расследования инцидентов информационной безопасности 121

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

Антропова А. В., Ефременков И. А., Козлов В. В., Лагун А. В. Методика оценивания тепловых нагрузок при пуске ракеты космического назначения 134

Батыршин Е. М., Пачин А. В., Столяров А. А. Интеллектуальная система восстановления работоспособности технических комплексов 144

Белянкин А. В., Дуга В. В., Полуян М. М. Повышение удельной излучательной способности радиаторов систем терморегулирования космических микроаппаратов 152

Винокуров Р. А., Власов С. А., Егоров А. Е., Кубасов И. Ю. Определение наибольшего разрыва во времени наблюдения при различных вариантах баллистических структур орбитальных группировок космических аппаратов глобального периодического обзора поверхности Земли 161

Вяльдин Д. М., Лисицкий В. В. Модель оценивания надежности информационно-измерительной системы в режиме реального времени 173

Забузов В. С., Захаров И. В., Мусаллам А. Усовершенствованный способ оптимизации количества контрольных точек при отказоустойчивой параллельной обработке информации 192

Калмыков Е. В., Кирюхин С. Н., Сайданов В. О. Математическая модель рабочего цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания и ее программная реализация 199

Калюта А. Н., Мальцев Г. Н., Склемин Д. В. Достоверность технического диагностирования сложных технических систем с использованием диагностических моделей 211

Камчалов С. С., Карагодин В. В., Рыбаков Д. В., Хомич И. В. Модели для исследования эффективности процессов функционирования систем электропитания ракетно-космических комплексов 220

Карагодин В. В., Хомич И. В. Обоснование необходимости совершенствования методов настройки параметров ПИД-регулятора возбуждения синхронного генератора системы автономного электроснабжения комплексов космических войск 228

Клейменов Ю. А., Хайруллин Р. З. Применение метода стохастического супериндикатора при идентификации вида закона распределения по результатам статистической обработки малых выборок в задачах прогнозирования безотказности сложных технических систем военного назначения 240

Кувыкин Ю. А., Смирнов А. П., Супрунюк В. В., Хайруллин Р. З. Модель процесса эксплуатации измерительной системы с встроенным контролем 248

Окороков М. В., Сухорученков Б. И. Проблема контроля безотказности технических систем с учетом параметрической надежности 255

Ревяков Б. А., Рыжий Н. В. Анализ потребления электрической энергии объектами наземной космической инфраструктуры 267

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

Башкирцев В. П., Кулганов В. А., Купцов И. М. Учет психологических аспектов в модели профессиональной подготовки военно-инженерных кадров в интересах повышения эффективности управления сложных человеко-машинных систем 279

Иноземцева Л. А., Кужекин Н. С. Психолого-педагогические проблемы формирования современной культуры обучения в военно-учебном заведении . 290

Мусяенко С. А. Входной контроль уровня обученности как нормативно-дидактическая детерминанта совершенствования процесса повышения квалификации педагогических работников 295

ВОПРОСЫ ГУМАНИТАРНЫХ И ОБЩЕСТВЕННЫХ НАУК

Гуторович О. В. Проблема техносферы и ее эволюции в контексте программы космической индустриализации К. Э. Циолковского 300

Рефераты статей 309

Сведения об авторах 318

Сведения о рецензентах 325

Е. С. Абазина,
кандидат технических наук, доцент;
А. А. Ерунов,
кандидат технических наук;
А. М. Махмутов;
Д. Ю. Мишин,
кандидат технических наук

РЕАЛИЗАЦИЯ СПОСОБА ВСТРАИВАНИЯ ДАННЫХ В ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ АНАЛОГОВО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

В статье проведен обзор применения известных методов цифровой стеганографии в изображениях, их основных недостатков и уязвимости к современным методам стегоанализа. Рассмотрены способы внедрения дополнительной информации в изображения на уровне шумов квантования в ходе аналогово-цифрового преобразования с учетом особенностей системы зрения человека. Представлен новый подход к встраиванию данных в видеоизображения в процессе аналогово-цифрового преобразования, позволяющий достичь повышения скрытности встраивания при обеспечении достоверности приема как скрываемой, так и используемой для встраивания открытой информации. Предлагаемый способ основан на внедрении шумоподобных сигналов в спектр изображения, получаемый в ортогональных базисах, отличных от используемых при дискретно-косинусном и вейвлет-преобразованиях алгоритмов сжатия. Согласованный выбор шумоподобных сигналов, применяемых для внедрения скрываемой информации, с ортогональными базисами для получения спектра изображения до стандартных процедур их сжатия позволяет не нарушать статистических характеристик изображения за счет приведения артефактов встраивания внедряемой информации к характеристикам шума квантования.

Ключевые слова: цифровая стеганография, скрытые каналы, аналогово-цифровое преобразование.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время информационные технологии являются неотъемлемой частью повседневной жизни любого человека. Современные тенденции развития инфотелекоммуникаций характеризуются резким ростом объемов передаваемых и хранимых данных, увеличением скорости их передачи и обработки. Стремление к унификации порядка обмена информацией и доступа к ней находит отражение в ужесточении регуляторных функций государства в сфере стандартизации протоколов передачи данных в соответствии с моделью OSI, а также в обеспечении возможности сопряжения с общепринятыми форматами представления данных. Требование унификации предъявляется как к существующим, так и к разрабатываемым технологиям сетей связи специального назначения, что создает предпосылки для упрощения доступа и технического анализа информационных потоков, циркулирующих, в том числе, по каналам, арендованным ведомствами у провайдеров телекоммуникационных услуг сетей общего пользования несанкционированными пользователями. В этом случае обеспечение безопасности ведомственной связи осуществляется преимущественно за счет использования криптомаршрутизаторов. Таким образом, безопасность связи напрямую зависит от криптостойкости используемых стандартов шифрования. Однако с учетом роста вычислительной способности современных квантовых компьютеров и потенциальных возможностей крупнейших центров обработки данных резко снижается время, затрачиваемое на вскрытие шифра. Данное обстоятельство приводит к реальной угрозе вскрытия и подмены служебной информации в процессе ее передачи по магистральным линиям связи и определяет необходимость поиска дополнительных способов защиты.

В настоящее время в дополнение к криптографическим методам защиты целесообразно использовать методы цифровой стеганографии, которые позволяют скрывать от нарушителя сам факт передачи данных. Основной принцип цифровой стеганографии состоит в замене

малозначащих и малозаметных элементов открытых сообщений (контейнеров), представленных в цифровом виде, элементами скрываемой информации [1–4].

ТЕХНОЛОГИЯ СКРЫТОЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В ПРОЦЕССЕ АНАЛОГОВО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЙ

Значительная избыточность цифровых изображений (подвижных и неподвижных), определяющая потенциальный объем скрываемой информации, предопределила их выбор для использования в качестве стегоконтейнера. Основные ограничения на реализацию скрытой передачи накладывает качество восприятия модифицированного контейнера конечными пользователями с открытым доступом, т. е. качество изображения (в первую очередь, визуальное) после встраивания в него скрываемых сведений. В этой связи, независимо от реализуемого метода цифровой стеганографии, особенности восприятия видеоизображения человеком требуют первостепенного учета [5].

Фактически система зрения человека является приемным устройством с ограниченной полосой пропускания по частоте (оптический диапазон) и амплитуде (яркость) входного сигнала. Незначительное изменение частоты или амплитуды входного сигнала не сразу оказывается заметным для человека. Данная особенность лежит в основе аналогово-цифрового преобразования (АЦП) и позволяет осуществить изменение сигнала из формы, используемой человеком, в форму, удобную для передачи, хранения или автоматической обработки.

Второй особенностью системы зрения человека является трехкомпонентное цветовое восприятие. Несмотря на то, что человек может отличить более 16 миллионов цветовых оттенков, в системе зрения они сводятся к комбинациям трех главных цветов: красного ($R - red$), зеленого ($G - green$) и синего ($B - blue$). Исходя из этого, все телевизионные камеры и другие технические датчики цветных изображений формируют три сигнала – R, G, B .

В ходе аналогово-цифрового преобразования непрерывного сигнала выполняются промежуточные операции дискретизации и квантования, при которых происходит незначительное изменение его формы с появлением шумов дискретизации и квантования. Данные шумы представляют собой разницу между аналоговым и цифровым сигналами.

Появление шумов квантования для цветного изображения представлено на рис. 1.



Рис. 1. Сравнение изображения и шумов квантования:

а – квантование изображения на 16 уровней (4-битное представление); б – квантование изображения на 256 уровней (8-битное представление)

По мере увеличения уровней квантования качество восприятия преобразованного изображения становится ближе к оригиналу, а шумы квантования перестают отражать контуры исходного изображения и больше напоминают флуктуационный шум. Однако повышение качества преобразованного сигнала сопряжено с увеличением объема данных, которые тре-

буется передать по каналам связи или же хранить. Поскольку изображение воспринимается человеческим глазом, как объемная проекция на плоскости, плавность изменения контуров достигается увеличением числа простейших элементов, несущих информацию о цвете (пикселей). Таким образом, увеличение разрешения дополнительно приводит к возрастанию требуемого объема информации для хранения и (или) передачи исходного изображения.

В результате операций аналогово-цифрового преобразования изображения с установленным шагом дискретизации и квантования, а также представлением полученных уровней квантования с требуемым разрешением формируется несжатый цифровой поток – видеоданные формата ВМР (*BitMaP* формат). Поскольку несжатое цифровое изображение обладает значительной избыточностью и занимает большой объем, именно формат ВМР наиболее популярен для выбора в качестве контейнера для скрытой передачи данных [2–4].

Процесс передачи данных по скрытому каналу описывает обобщенная модель стегосистемы [1–3], представленная на рис. 2. Скрываемое сообщение S по выбранному правилу ρ встраивается в контейнер I , в результате чего формируется заполненный контейнер (стега) I' . На приемной стороне получатель в соответствии с выбранным правилом ρ извлекает из заполненного контейнера I' скрытое сообщение S' .



Рис. 2. Обобщенная модель стегосистемы

Основным методом сокрытия данных в изображениях формата ВМР является замена наименее значащих бит (НЗБ) этих изображений данными, требующими сокрытия [2–4]. Правило сокрытия данных в изображениях методом НЗБ может быть представлено следующим образом:

$$\rho^{\text{НЗБ}} : I' = I + S^{\text{НЗБ}}. \quad (1)$$

Простота реализации данного метода цифровой стеганографии определяет его низкую скрытность для стегоанализа. Построение изображения из коэффициентов НЗБ [2–4] покажет наличие в контейнере скрываемых данных (рис. 3).

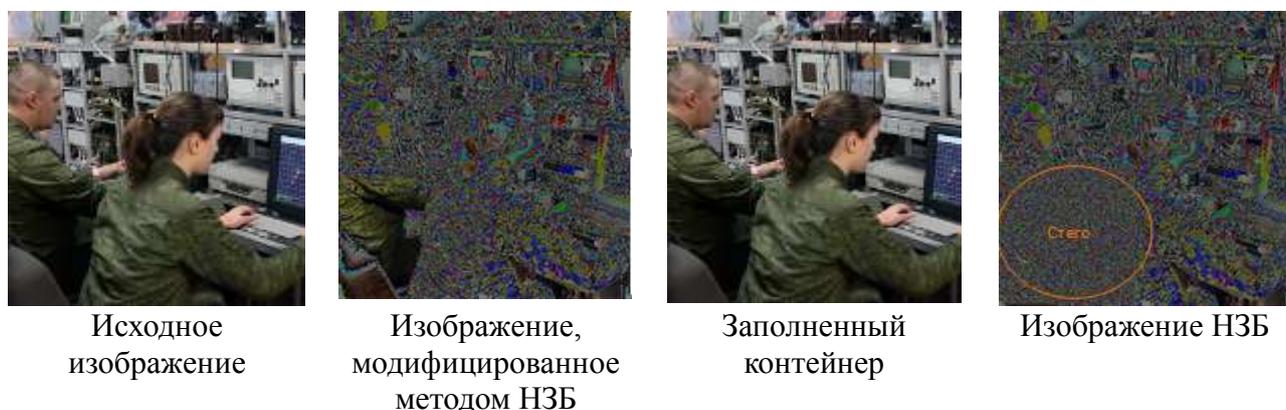


Рис. 3. Проверка скрытности встраивания в результате анализа статистики НЗБ изображения

Дальнейшее развитие метода замены НЗБ [4] велось в направлении повышения скрытности встраивания, которое основано на сокращении вносимой информации и ее распределении случайным образом в области НЗБ изображения.

В методе псевдослучайного интервала [4] встраивание данных осуществляется заменой НЗБ в пикселях, выбранных с псевдослучайным интервалом h :

$$\rho^{\text{ПСИ}} : I' = I + S^{\text{НЗБ}_h} . \quad (2)$$

В методе псевдослучайной перестановки [3, 4] встраивание данных осуществляется заменой НЗБ в пикселях по правилу псевдослучайной перестановки φ_i :

$$\rho^{\text{ПСП}} : I' = I + S^{\text{НЗБ}_{\varphi_i}}, \varphi_i - \text{ПСП} . \quad (3)$$

В методе блочного скрывания [4] встраивание данных осуществляется заменой НЗБ не всего изображения, а только в D блоках. Правило встраивания в этом случае имеет вид

$$\rho^{\text{Блоч}} : I' = \frac{I}{D} + S^{\text{НЗБ}}, \quad (4)$$

где D – число блоков.

Рассмотренная группа методов предполагает использование в качестве контейнера только изображений формата BMP, которые из-за своей избыточности чаще всего являются промежуточными до этапа передачи или хранения. В большинстве современных цифровых камерах заложены кодеки, которые реализуют операцию сжатия по одному из эффективных алгоритмов с преобразованием формата данных (.jpg, .avi, .mp2, .mp4). В процессе сжатия встроенные в область НЗБ данные разрушаются (рис. 4).

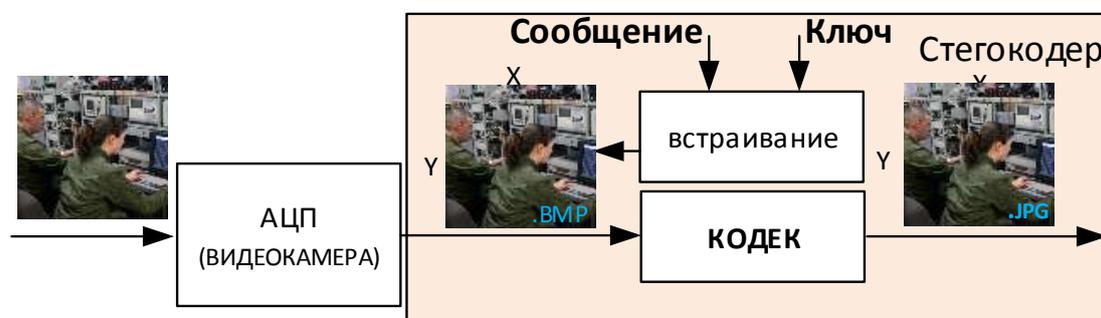


Рис. 4. Модель стегосистемы с встраиванием данных при АЦП до сжатия изображения

При небольших степенях сжатия данная проблема может быть решена внесением избыточности встраиваемых данных путем преобразования стегосообщения к виду шумоподобного сигнала (ШПС) [2–4].

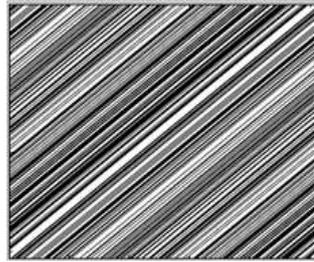
$$\rho^{\text{ШПС}} : I' = I + S^{\text{НЗБ}_{\omega}}, \quad (5)$$

где ω – шумоподобный сигнал.

Данный подход предполагает перемножение бит скрываемого сообщения с ШПС и последующую замену полученными значениями НЗБ изображения. Реализация расширения спектра скрываемого сообщения позволяет повысить его устойчивость к операциям сжатия. Тем не менее скрытность встраивания остается на низком уровне. Использование для встраивания M-последовательностей или матрицы Адамара в качестве ШПС с последующей модуляцией ШПС скрываемыми данными и дальнейшим встраиванием в плоскости НЗБ визуально соответствует вносимому шуму (рис. 5).



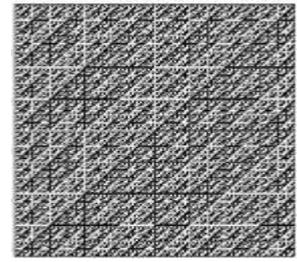
Заполненный
контейнер методом
НЗБ с
использованием
ШПС на основе М-
последовательности



Визуализация ШПС
на основе М-
последовательности



Заполненный
контейнер методом
НЗБ с
использованием
ШПС на основе
матрицы Адамара



Визуализация ШПС
на основе матрицы
Адамара

Рис. 5. Визуальная проверка скрытности встраивания

Поскольку встраивание скрываемых сведений осуществляется до сжатия, то после его проведения и передачи изображения по каналу связи извлекаемые стеганографические данные из плоскости НЗБ на приемной стороне искажаются и частично теряются. Однако возможность определения наличия стеговложения в изображении третьими лицами существует и реализуется при помощи следующих методов стегоанализа:

- метода χ^2 [2];
- RS-метода [2];
- анализа гистограммы изображения [6].

Все три метода схожи между собой и основаны на анализе статистики распределения значений цветов (яркости) изображения. При этом наиболее наглядным является метод анализа гистограммы изображения. В случае наличия в изображении стеганографического встраивания проявится демаскирующий признак «наличие раздвоения пика гистограммы» (рис. 6), который отражает изменение числа пикселей цветности (или яркости), отличным от исходного на величину θ :

$$\theta = 2^b, \quad (6)$$

где b – порядковый номер НЗБ, используемый для замены.

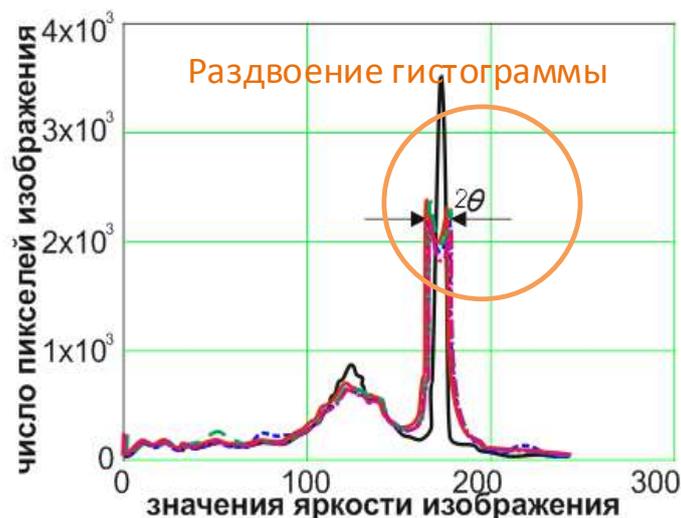


Рис. 6. Сравнение пиков гистограмм пустого и заполненного контейнеров

Устранение данного демаскирующего признака согласно работам [3, 6] осуществляется путем расширения спектра встраиваемого сообщения в область спектральных преобразований. Суть данного подхода в отличие от предыдущего заключается во встраивании ШПС не в битовую плоскость изображения контейнера, а в коэффициенты ортогонального преобразования яркостной компоненты (рис. 7).

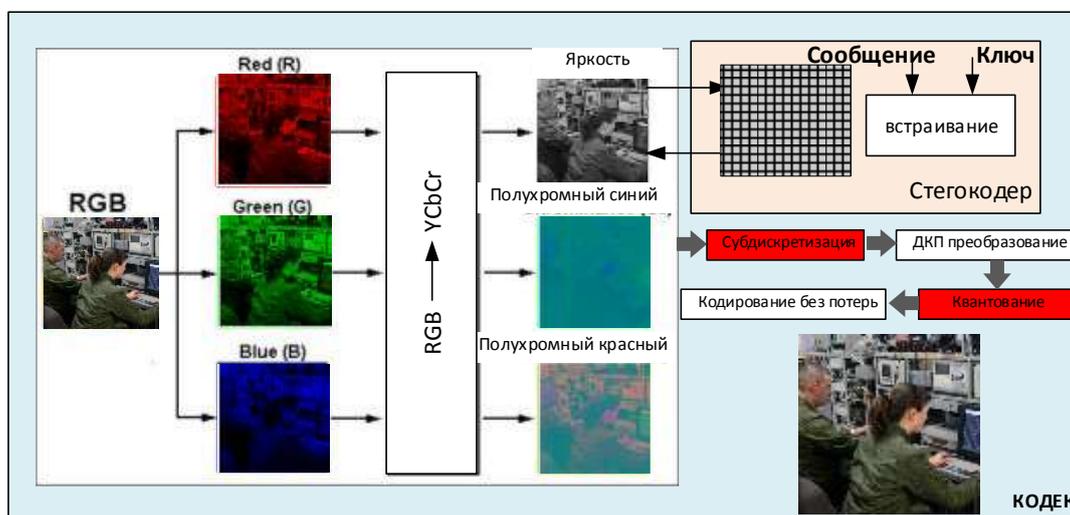


Рис. 7. Модель стегосистемы с встраиванием данных в яркостную компоненту до сжатия изображения

В качестве ортогонального базиса в работе [6] используется дискретно-косинусное преобразование (ДКП). Тогда правило сокрытия приобретает вид

$$\rho^{\text{ПРС}} : I' = I^{\text{ДКП}} + S^{\text{ДКП}}_{\omega}, \quad (7)$$

где ω – шумоподобный сигнал.

Фактически реализация данного метода приведет к модификации работы алгоритма сжатия данных, заложенных в работе кодека. Выбор же в качестве объекта встраивания яркостной компоненты обусловлен значительными потерями цветовой составляющей на этапе дискретизации, в ходе которой теряется 75 % значений цвета.

Высокая скрытность данного способа базируется на схожести модулированного встроенного сообщения с естественными шумами, появляющимися в процессе АЦП и в канале связи, при этом нарушение статистики гистограмм практически не наблюдается (рис. 8).

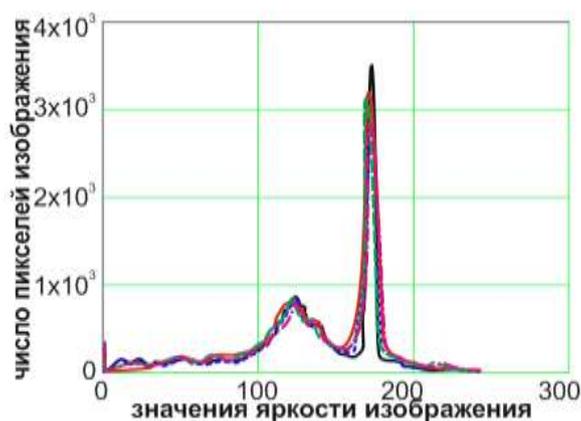


Рис. 8. Сравнение гистограмм пустого и заполненного контейнеров

Помимо скрытности встраивания U [1–4] во всех методах цифровой стеганографии существует противоречие между скрытой пропускной способностью $C_{стег}$ и достоверностью приема $P_{ош}$ (рис. 9).

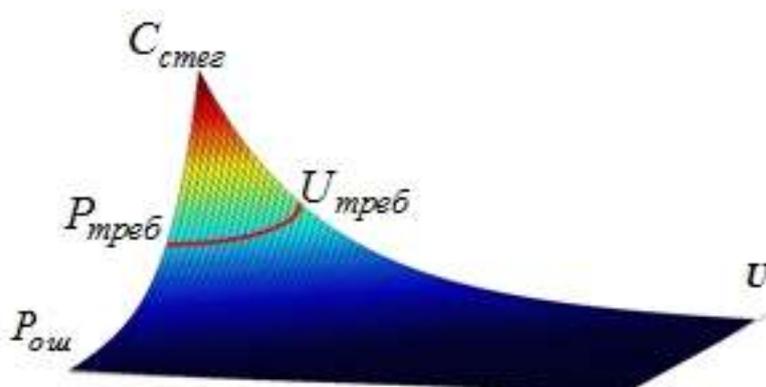


Рис. 9. Основное противоречие в стеганографии

Исходя из данного противоречия вытекает основной недостаток метода встраивания ШПС [6], который заключается в небольшой скрытой пропускной способности и невозможности организовать более одного скрытого канала. Решение вопроса организации множественного доступа было получено при разработке метода кодового уплотнения скрываемых данных (КУСК) [7, 8] за счет кодового разделения скрываемых данных.

Суть данного метода заключается во встраивании модулированной двумерной шумоподобной сигнальной конструкции (ДШСК) Франка – Крестенсона F_N в коэффициенты ортогонального преобразования Виленкина – Крестенсона $(I)^{ОртП-ВК}$, а правило имеет вид

$$\rho^{КУСК} : I' = I^{ОртП-ВК} + S \cdot F_N. \quad (8)$$

Каждая строка ДШСК представляет собой шумоподобную последовательность, ортогональную остальным строкам. Именно ДШСК выполняет роль кодового разделения скрываемых данных. Кроме того, выбор в качестве ортогональных базисов для встраивания ШПС, отличных от ДКП, дополнительно позволяет повысить скрытность встраивания. Это обусловлено тем, что ДКП используется в алгоритмах сжатия и современные методы стегоанализа также проверяют статистику коэффициентов ДКП изображения.

Поскольку разработанный способ встраивания данных с кодовым уплотнением в видеоданных [7] реализует внесение дополнительной информации до сжатия видеоизображения, его основным ограничением является степень сжатия в видеокодере (рис. 10).

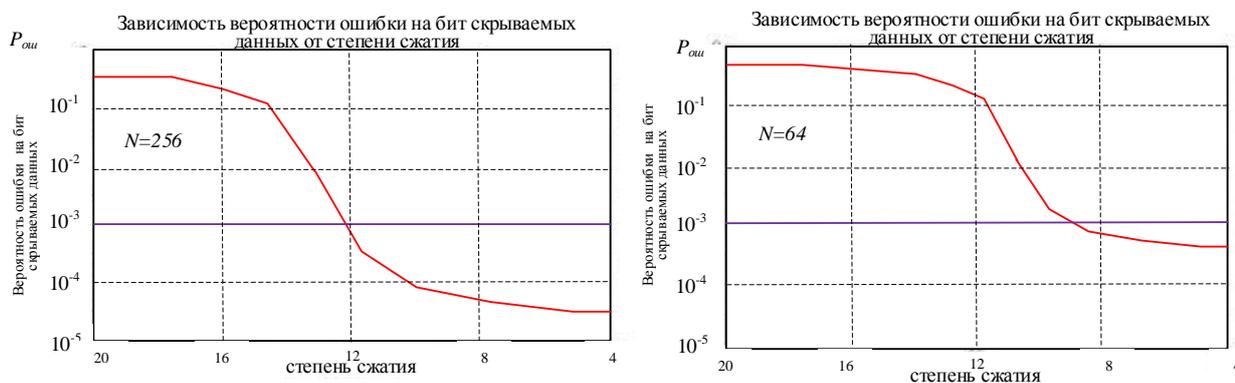


Рис. 10. Устойчивость встраиваемых данных к сжатию в кодере

Как видно из рисунка, встраивание данных разработанным способом [7, 8] с периодом ДШСК $N = 64$ и 256 обеспечивает достоверность извлечения встроеного сообщения не хуже 10^{-3} при степенях сжатия изображения JPEG в 8–12 раз соответственно. Поскольку в видеопотоке MPEG-2 применительно к опорным кадрам также используется алгоритм сжатия JPEG, при сжатии исходного видеопотока в 60–90 раз из него можно извлечь скрываемые данные [7, 8].

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ СПОСОБА ВСТРАИВАНИЯ ДАННЫХ В ПРОЦЕССЕ АНАЛОГОВО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЯ

Развитие представленного способа встраивания [7, 8] было направлено на решение практических задач, возникших в процессе организации скрытого канала в структуре видеоданных. К таким задачам относятся:

- реализация разноприоритетного доступа к скрытому каналу [9, 10];
- учет переменной емкости случайного видеопотока и реализация адаптивного встраивания сообщений в пригодные блоки видеоконтейнера [11, 12];
- учет влияния ошибок в канале доноре на скрываемые данные за счет контроля целостности скрытого информационного обмена и согласования работы стегакодера и декодера в канале-доноре [13, 14].

На рис. 11 показана динамика изменения скорости в стегаканале, организованном в видеопотоке SD-качества. Представленные результаты показывают, что объем встроеного сообщения для разработанного способа [7] составляет около 1% от размера выбранного контейнера. Таким образом, разработанный способ встраивания позволяет организовать низкоскоростной стегаканал в структуре видеоданных.

Динамика изменения скорости передачи данных в стегаканале

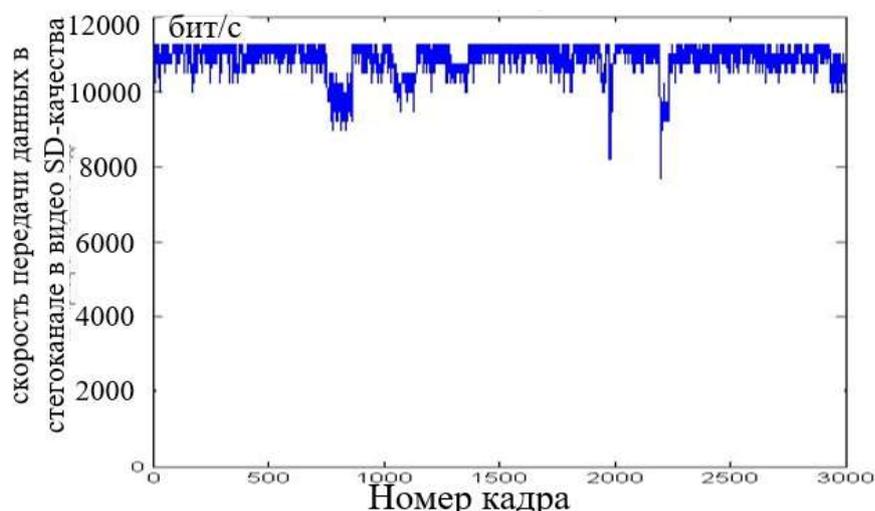


Рис. 11. Изменение скорости передачи в стегаканале, организованном в видеопотоке SD-качества

При практической реализации данного способа разработаны программы для ЭВМ [15, 16], которые позволяют осуществлять встраивание и извлечение текстовых файлов формата txt в JPEG-изображения или в видеофайлы формата AVI, MPEG-2, MPEG-4.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, разработанный способ встраивания данных в процессе аналогово-цифрового преобразования видеоизображения позволяет организовать скрытый информационный обмен в открытых сетях с доступом в интернет или же внутри каналов телевизионного вещания. В качестве контейнеров выбраны широко используемые форматы изображений и видеофайлов. Скрытность встраивания обеспечивается за счет добавления скрытой информации на уровне шумов, не превышающих уровня шумов квантования АЦП. Готовые программные решения позволяют в организованном скрытом канале обеспечить минимальное качество связи, необходимое для передачи текстовых сообщений и мультимедийных файлов нереального времени в режиме передачи данных.

Список используемых источников

1. *Цветков К. Ю., Абазина Е. С.* Концептуальная модель взаимодействия стеганографических систем передачи в составе эталонной модели взаимодействия открытых систем // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 668. – С. 70–80.
2. *Грибунин В. Г., Оков И. Н., Туринцев И. В.* Цифровая стеганография. – М. : Солон-Пресс, 2002. – 272 с.
3. *Коржик В. И., Краснов А. В.* Цифровая стеганография : учебник. – М. : Кнорус, 2023. – 324 с.
4. *Абазина Е. С., Ерунов А. А.* Сравнительный анализ и классификация методов цифровой и компьютерной стеганографии и перспективные направления ее развития // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2016. – Вып. 655. – С. 5–16.
5. ГОСТ 26320-84. Оборудование телевизионное студийное и внестудийное. Методы субъективной оценки качества цветных телевизионных изображений. – М. : Изд-во стандартов, 1985. – 8 с.
6. *Небаева К. А.* Разработка необнаруживаемых стегосистем для каналов с шумом : дис. ... канд. техн. наук : 05.12.13. – СПб., 2014. – 176 с.
7. Пат. № 2616869 Рос. Федерация. Способ скрытой передачи информации с кодовым уплотнением в видеоданных / Цветков К. Ю., Федосеев В. Е., Коровин В. М., Абазина Е. С.; патентообладатель ВКА им. А. Ф. Можайского. – № 2616869; заявл. 13.04.2015; опубл. 18.04.2017. Бюл. № 11. – 1 с.
8. *Абазина Е. С., Ерунов А. А.* Результаты моделирования метода скрытой передачи информации с кодовым уплотнением в видеоданных. Системы управления, связи и безопасности. – СПб., 2015 – № 2. – С. 1–25.
9. *Цветков К. Ю., Ерунов А. А., Абазина Е. С.* Алгоритм кодового уплотнения скрытых каналов с учетом приоритетов абонентов // Известия Института инженерной физики. – 2016. – № 4 (42). – С. 25–31.
10. *Ерунов А. А., Леванов Д. В., Севостьянов А. С.* Способ организации разноприоритетного доступа в групповом скрытом канале с переменной скоростью передачи // Известия Института инженерной физики. – 2020. – № 4 (58). – С. 17–20.
11. *Ерунов А. А., Коровин В. М., Гончаров А. В.* Модель скрытого канала передачи информации с адаптивным кодовым уплотнением в видеопотоке // Системы управления связи и безопасности. – 2018. – № 2. – С. 1–17.
12. *Цветков К. Ю., Ерунов А. А., Леванов Д. В.* Формирование ключевой информации для организации скрытого канала с адаптивным кодовым уплотнением // Известия Института инженерной физики. – 2021. – № 4 (62). – С. 20–27.

13. *Абазина Е. С., Федосеев В. Е., Леванов Д. В.* Алгоритм обеспечения достоверности доставки данных по спутниковому стегоканалу с учетом потерь в среде передачи // Вопросы оборонной техники. Сер. 16 : Технические средства противодействия терроризму. – 2022. – № 7-8 (169-170). – С. 22–27.

14. *Цветков К. Ю. Ерунов А. А., Леванов Д. В.* Имитационная модель спутникового стегоканала в среде передачи с потерями // Известия Института инженерной физики. – 2023. – №1 (67). – С. 51–55.

15. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2023610869. Программа формирования скрытого канала в видеоконтейнере с учетом ошибок в открытом канале связи / К. Ю. Цветков, А. А. Ерунов, Е. С. Абазина, Д. В. Леванов, Р. Р. Рахимов. – Заявл. 19.12.2022, опубл. 13.01.2023.

16. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2023615388. Программа формирования скрытого канала в процессе аналогово-цифрового преобразования видеоконтейнера / К. Ю. Цветков, А. А. Ерунов, Е. С. Абазина, Д. В. Леванов, Е. Н. Астахов. – Заявл. 03.03.2023, опубл. 14.03.2023.

Е.В. Благодыренко,
кандидат технических наук;
В. И. Горбулин,
доктор технических наук, профессор;
С. В. Логунов,
кандидат технических наук;
Н. В. Радионов,
доктор экономических наук, профессор

МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ ПЕРИОДОВ БЛАГОПРИЯТНЫХ УСЛОВИЙ НАБЛЮДЕНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НАЗЕМНЫМИ ОПТИЧЕСКИМИ СРЕДСТВАМИ

В статье проведен расчет продолжительности теневого участка орбиты искусственного космического объекта для случая цилиндрической тени Земли. Получено выражение, определяющее нахождение искусственного космического объекта на границе цилиндра тени Земли. Представлено уравнение четвертой степени, которое позволяет определить соответствующие точки пересечения «бесконечного» цилиндра тени Земли как в сторону Солнца, так и в противоположном направлении. В статье показано, что цилиндрическое представление тени Земли в солнечном свете верно описывает условия освещенности орбит искусственного космического объекта только вблизи поверхности Земли, а на высоких орбитах это представление может привести к ошибочным выводам и решениям. В результате авторами определено условие нахождения искусственного космического объекта на поверхности конуса полной тени Земли и условие нахождения объекта на границе полутеневого конуса. Получены значения углового положения Солнца, характеризующие начало и окончание периода «бестеневых зон» в году.

Ключевые слова: аргумент широты, искусственный космический объект, истинная аномалия, тень Земли, эклиптика, эксцентрисическая аномалия.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наземные оптические системы (НОС) используются для наблюдения искусственных космических объектов (ИКО) во всем диапазоне высот их орбит полета с целью мониторинга космической обстановки, каталогизации ИКО и объектов «космического мусора» (КМ), а также для предупреждения об опасных ситуациях в околоземном космическом пространстве (ОКП) [1]. Пассивный режим работы НОС накладывает ряд ограничений на процесс их функционирования при сопровождении ИКО, связанных с возможностями приема и регистрации оптического излучения солнечной подсветки, отраженного от поверхности наблюдаемых объектов [2]. Эти ограничения необходимо учитывать при планировании применения НОС наблюдения ИКО.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для оценочных расчетов теневых участков обычно форму Земли можно представить в виде сферы радиусом R_3 . Тогда без учета преломления света в тонком слое атмосферы, принимая параллельное направление всех лучей солнечного света, тень Земли можно представить в виде цилиндра (бесконечного с одной стороны), основанием которого служит большой круг Земли, перпендикулярный текущему направлению на Солнце (рис. 1).

Постановка задачи расчета продолжительности теневого участка орбиты ИКО при оценочных расчетах для случая цилиндрической тени Земли обычно сводится к поиску двух значений угла положения объекта на орбите (истинной аномалии или аргумента широты ИКО), один из

которых соответствует моменту входа в тень, а второй – моменту выхода из тени. При этом известные в литературе методики (например, [3]) получены при условии фиксации положения Солнца на эклиптике в некоторый заданный день d . Поэтому для расчета дней (периодов) «бестеневых зон» и получения достоверного результата требуется многократное (до 360 раз) применение этих методик. Однако дальнейшее решение задачи поиска промежутка времени «бестеневой зоны» ИКО также сведено к численному перебору возможных решений. Рассмотрим далее модификацию предложенного в [4] метода для поиска аналитических зависимостей, не требующих численных итерационных расчетов.

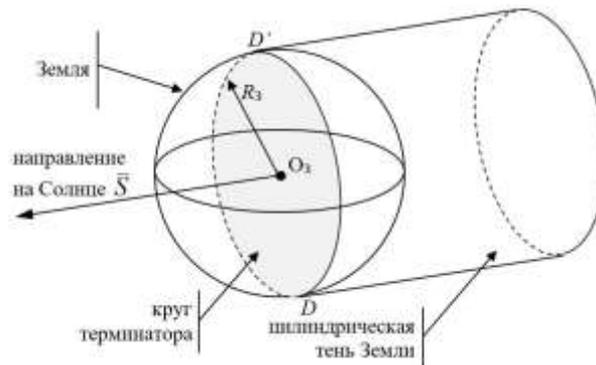


Рис. 1. Схема цилиндрической тени Земли

Из курса астрономии известно, что в первом приближении можно принять движение Солнца по эклиптике равномерным круговым (рис. 2) [5]. Тогда, пренебрегая его смещением по эклиптике в течение расчетного дня d , отсчитываемого от 1 января, направляющие косинусы орта \bar{S} направления на Солнце в день d в абсолютной геоцентрической экваториальной системе координат (АГЭСК) можно вычислить по формулам:

$$X_S = \cos \varepsilon_S \cdot \cos \lambda_S; \quad Y_S = \cos \varepsilon_S \cdot \sin \lambda_S; \quad Z_S = \sin \varepsilon_S, \quad (1)$$

где λ_S – долгота Солнца по экватору Земли в день d , $\lambda_S = \arcsin \frac{\operatorname{tg} \varepsilon_S}{\operatorname{tg} \delta_S}$;

ε_S – склонение (среднее) Солнца к экватору Земли, $\varepsilon_S = \arcsin(\sin \delta_S \cdot \sin u_S)$;

u_S – долгота (средняя) Солнца на эклиптике в день d , $u_S = 2\pi \cdot \frac{d - 80}{365,25}$;

δ_S – наклонение (среднегодовое) эклиптики к плоскости экватора Земли.

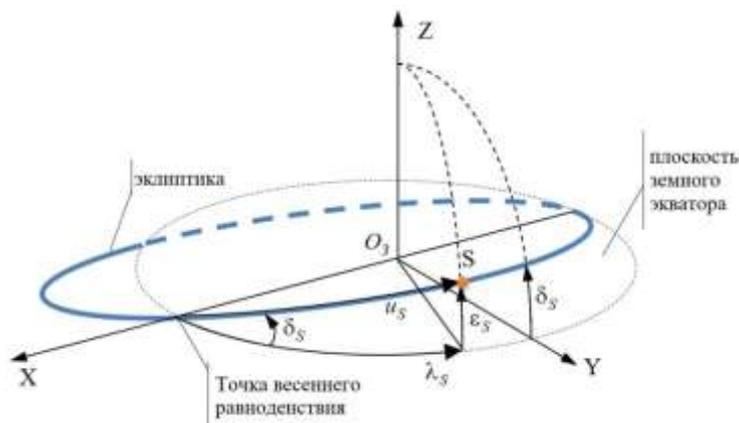


Рис. 2. Схема движения Солнца по эклиптике

При известных мгновенных оскулирующих параметрах движения ИКО $a, e, i, \omega, \Omega, \tau_{\Pi}$ положение его центра масс в момент t от начала года на орбите в АГЭСК определяется по формулам:

$$\begin{aligned} X &= r(\cos \Omega \cdot \cos u - \sin \Omega \cdot \sin u \cdot \cos i); \\ Y &= r(\sin \Omega \cdot \cos u + \cos \Omega \cdot \sin u \cdot \cos i); \\ Z &= r \cdot \sin u \cdot \sin i, \end{aligned} \quad (2)$$

где r – модуль радиуса-вектора \vec{r} ИКО, $r = a(1 - e \cdot \cos E) = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$;

u – аргумент широты ИКО, $u = 2 \arctg \left[\sqrt{(1+e)/(1-e)} \cdot \operatorname{tg} E/2 \right] + \omega$;

E – эксцентрисическая аномалия ИКО,

$$E = e \cdot \sin E + \sqrt{\frac{\mu}{a^3}} \cdot \left(t - 24 \cdot 3600 \cdot \left(\left[\frac{t}{24 \cdot 3600} \right]_{\text{mod} 1} - 1 \right) - \tau_{\Pi} \right);$$

τ_{Π} – время первого прохождения ИКО перигея орбиты на дату 1 января.

Нетрудно заметить, что в принятых условиях в моменты нахождения объекта на границе тени плоскость, проходящая через два вектора – орт направления на Солнце и радиус-вектор ИКО – делит цилиндр тени Земли пополам. Графическая иллюстрация этого факта представлена на рис. 3,а.

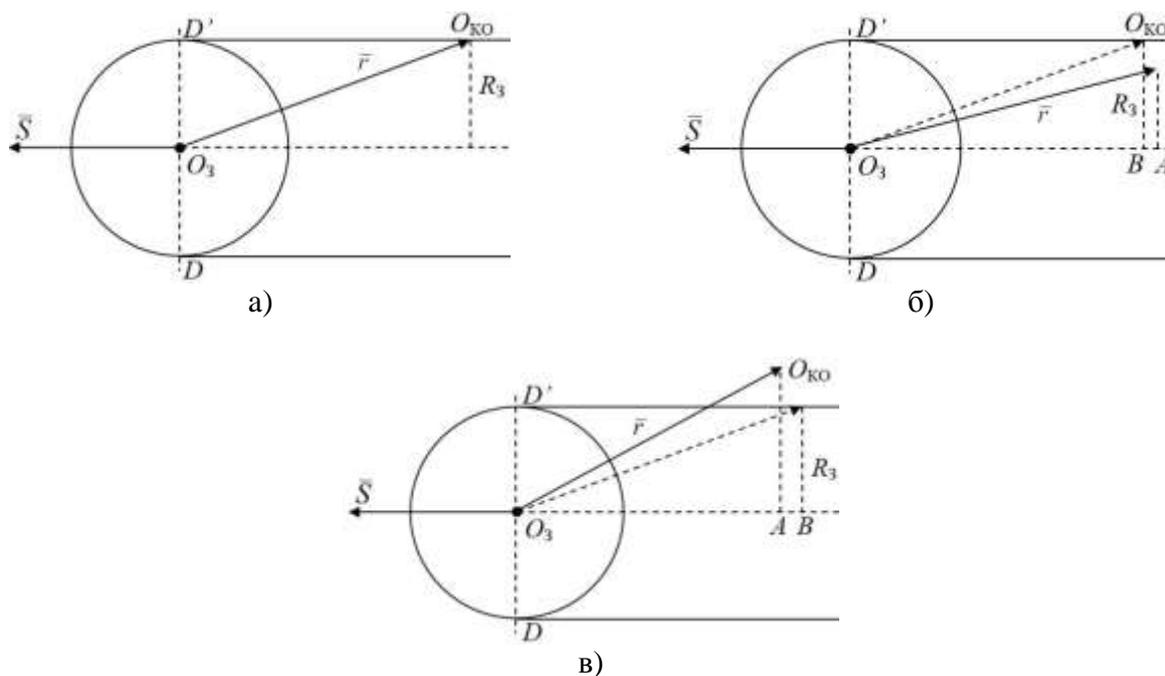


Рис. 3. Определение условий нахождения искусственного космического объекта в тени Земли:

а – условие на границе тени Земли; б – условие в тени Земли; в – условие освещенности искусственного космического объекта

Из рис. 3,а видно, что математическое условие нахождения центра масс ИКО $O_{\text{КО}}$ на границе тени Земли можно представить в виде следующего векторного уравнения:

$$(\vec{r}, \vec{S}) + \sqrt{|\vec{r}|^2 - R_3^2} = 0. \quad (3)$$

В этом уравнении учтено условие «противоположности направления» на ИКО и Солнце $(\bar{r}, \bar{S}) < 0$, которое является необходимым для нахождения объекта в тени Земли. При этом достаточным для нахождения ИКО в тени Земли является условие строгого неравенства:

$$(\bar{r}, \bar{S}) + \sqrt{|\bar{r}|^2 - R_3^2} < 0. \quad (4)$$

Геометрическое пояснение этого неравенства показано на рис. 3,б и 3,в.

РАСЧЕТ КООРДИНАТ ТОЧЕК ПЕРЕСЕЧЕНИЯ ОРБИТЫ ИСКУССТВЕННОГО КОСМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА С ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ТЕНЬЮ ЗЕМЛИ

Из построений на рис. 3 видно, что нахождение ИКО в тени Земли определяется соотношением отрезков O_3A и O_3B : неравенство $O_3A > O_3B$ является необходимым условием тени и достаточным условием при $(\bar{r}, \bar{S}) < 0$. После подстановки координат (1) и (2) в условие (3) и несложных преобразований можно получить выражение, определяющее нахождение ИКО на границе цилиндра тени Земли:

$$(1 - e \cdot \cos E) \cdot ((\cos \Omega \cdot \cos u - \sin \Omega \cdot \sin u \cdot \cos i) \cdot \cos \varepsilon_s \cdot \cos \lambda_s + (\sin \Omega \cdot \cos u + \cos \Omega \cdot \sin u \cdot \cos i) \cdot \sin \lambda_s \cdot \cos \varepsilon_s + \sin u \cdot \sin i \cdot \sin \varepsilon_s) + \sqrt{(1 - e \cdot \cos E)^2 - \frac{R_3^2}{a^2}} = 0.$$

С учетом представленной выше зависимости аргумента широты ИКО от эксцентрической аномалии $u = u(E)$ для получения окончательного решения задачи необходимо найти решение двух иерархически связанных рекуррентных уравнений:

– уравнение прохождения по границе тени Земли

$$(1 - e \cdot \cos E) \cdot ((\cos \Omega \cdot \cos u - \sin \Omega \cdot \sin u \cdot \cos i) \cdot \cos \varepsilon_s \cdot \cos \lambda_s + (\sin \Omega \cdot \cos u + \cos \Omega \cdot \sin u \cdot \cos i) \cdot \sin \lambda_s \cdot \cos \varepsilon_s + \sin u \cdot \sin i \cdot \sin \varepsilon_s) + \sqrt{(1 - e \cdot \cos E)^2 - \frac{R_3^2}{a^2}} = 0; \quad (5)$$

– уравнение эксцентрической аномалии

$$E = e \cdot \sin E + \sqrt{\frac{\mu}{a^3}} \cdot \left(t - 24 \cdot 3600 \cdot \left(\left[\frac{t}{24 \cdot 3600} \right]_{\text{mod} 1} - 1 \right) - \tau_{\text{II}} \right),$$

с учетом соотношения для аргумента широты ИКО

$$u = 2 \cdot \arctg \left[\sqrt{\frac{1+e}{1-e}} \cdot \tg \frac{E}{2} \right] + \omega,$$

а также величины долготы (средней) Солнца на эклиптике, склонения (среднего) Солнца и долготы Солнца по экватору Земли в момент t :

$$u_s = 2\pi \cdot \frac{t}{365,25} - 80; \quad \varepsilon_s = \arcsin(\sin \delta_s \cdot \sin u_s); \quad \lambda_s = \arcsin \frac{\tg \varepsilon_s}{\tg \delta_s}.$$

Однако в таком виде применение даже итерационного метода решения (перебора вариантов) оказывается чрезвычайно сложным без достаточно хорошего начального приближения. Для его поиска можно воспользоваться следующим упрощением.

Пусть величины склонения (среднего) Солнца и долготы Солнца по экватору Земли фиксированы: $\varepsilon_s = \varepsilon_s^0$; $\lambda_s = \lambda_s^0$. Тогда, воспользовавшись известным соотношением между истинной и эксцентрической аномалиями, имеем

$$\operatorname{tg} \frac{\vartheta}{2} = \operatorname{tg} \frac{E}{2} \cdot \sqrt{\frac{1+e}{1-e}}$$

и выражением синусов и косинусов через половинные углы

$$\sin \alpha = \frac{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}}; \quad \cos \alpha = \frac{1 - \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}}{1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}},$$

из уравнения (3) можно получить уравнение прохождения ИКО по границе цилиндрической тени Земли на витке орбиты объекта относительно истинной аномалии ИКО в следующем виде:

$$\left(2A \cdot \operatorname{tg} \frac{\vartheta}{2} - B \left(1 - \operatorname{tg}^2 \frac{\vartheta}{2} \right) \right)^2 = \left(1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\vartheta}{2} \right)^2 - C^2 \left(D + \operatorname{tg}^2 \frac{\vartheta}{2} \right)^2,$$

где $A = \sin \omega \cdot \cos \varepsilon_s^0 \cdot \cos \gamma_s^0 + (\cos i \cdot \cos \varepsilon_s^0 \cdot \sin \gamma_s^0 - \sin i \cdot \sin \varepsilon_s^0) \cdot \cos \omega$;

$B = \cos \omega \cdot \cos \varepsilon_s^0 \cdot \cos \gamma_s^0 - (\cos i \cdot \cos \varepsilon_s^0 \cdot \sin \gamma_s^0 - \sin i \cdot \sin \varepsilon_s^0) \cdot \sin \omega$;

$$C = \frac{R_3}{a(1+e)};$$

$$D = \frac{1+e}{1-e};$$

$$\gamma_s^0 = \Omega - \lambda_s^0.$$

Наконец, обозначив $x = \operatorname{tg}(\vartheta / 2)$, получим уравнение четвертой степени

$$(B^2 + C^2 - 1) \cdot x^4 + 4 \cdot A \cdot B \cdot x^3 + 2 \cdot (2 \cdot A^2 - B^2 + C^2 \cdot D - 1) \cdot x^2 - 4 \cdot A \cdot B \cdot x + B^2 + C^2 \cdot D^2 - 1 = 0,$$

которое решается известным аналитическим методом [6]. В общем случае данное уравнение имеет либо два, либо четыре действительных корня, которые соответствуют точкам пересечения «бесконечного» цилиндра тени Земли как в сторону Солнца, так и в противоположном направлении. Если уравнение имеет только комплексные корни, то это свидетельствует об отсутствии пересечений с цилиндром тени Земли.

В первом случае для окончательного выбора двух действительных решений входа и выхода из тени Земли достаточно их проверить на выполнение условия (4). В частности, при двух действительных корнях и невыполнении условия (4) имеет место так называемая «бестеневая» орбита. В случае комплексных корней, очевидно, также имеет место «бестеневая» орбита.

РАСЧЕТ ГРАНИЦ ТЕНЕВЫХ И ПОЛУТЕНЕВЫХ УЧАСТКОВ ОРБИТЫ ИСКУССТВЕННОГО КОСМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА ВОКРУГ ЗЕМЛИ

При решении задач мониторинга космической обстановки и предупреждения об опасных ситуациях в ОКП наибольший практический интерес представляет наблюдение низкоорби-

тальных ИКО, к которым принято относить объекты с высотами орбит до 2000 км [7]. Как показывает анализ, условия видимости таких ИКО выполняются, в основном, в сумерки для НОС и цилиндрическое представление тени Земли в солнечном свете достаточно хорошо описывает условия освещенности орбит ИКО вблизи поверхности Земли. Однако в дальней операционной зоне (например, на геостационарной орбите) это представление может привести к ошибочным выводам и решениям [8]. Дело в том, что, несмотря на существенную удаленность Солнца от Земли, видимый на дальней операционной зоне диск Солнца все же больше видимого диска Земли. Это обстоятельство не позволяет представлять лучи солнечного света параллельными и, тем самым, приводит к невозможности представлять тень Земли в таких лучах как цилиндрическую.

С учетом прежнего предположения о шарообразной форме Земли при условии не параллельных солнечных лучей тень Земли, как показано на рис. 4, будет представлять собой двойную телесно-конусную структуру.

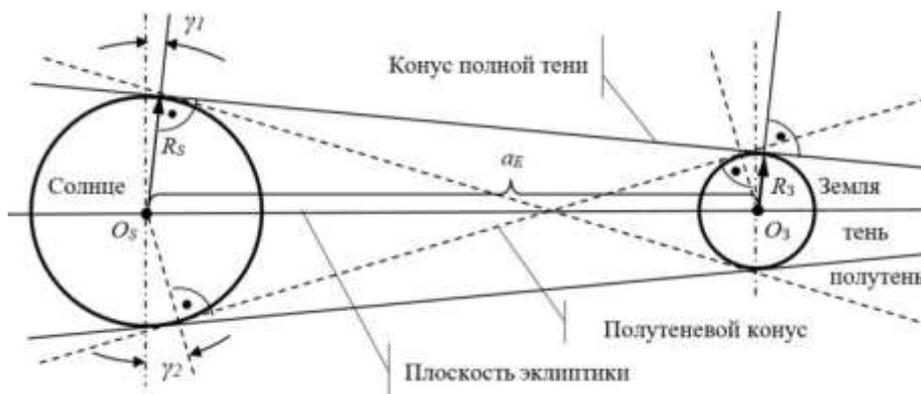


Рис. 4. Схема образования двойной конусной структуры тени Земли в солнечном свете

На рисунке эта конусная структура показана в проекции на плоскость, проходящую через центры масс Солнца O_S и Земли O_3 и перпендикулярную плоскости эклиптики. Из рис. 4 видно, что конус полной тени образован линиями касательными к сферам Солнца и Земли. Стороны этого конуса показаны сплошными линиями. Полуугол (половину телесного угла) конуса полной тени γ_1 с учетом расстояния между Солнцем и Землей a_E (в среднем 1 а.е.) и радиусов солнечной R_S и земной R_3 сфер можно рассчитать из выражения

$$\sin \gamma_1 = \frac{R_S - R_3}{a_E}. \quad (6)$$

Зона полутени (включающая и зону полной тени), как видно из рис. 4, представляет собой часть телесного конуса, также образованного касательными к двум сферам – Солнца и Земли. Однако для этого конуса касательные являются «двухсторонними» по отношению к плоскости эклиптики (на рисунке показаны пунктиром). Полуугол (половину телесного угла) полутеневого конуса можно рассчитать из выражения

$$\sin \gamma_2 = \frac{R_S + R_3}{a_E}. \quad (7)$$

Условие нахождения ИКО на границе полной тени Земли можно найти из геометрического построения, представленного на рис. 5.

По аналогии с условием (3) нахождения радиуса-вектора ИКО \vec{r} на поверхности цилиндрической тени Земли для поверхности конической тени можно записать:

$$(\vec{r}, \vec{S}) + \sqrt{r^2 - \rho^2} = 0.$$

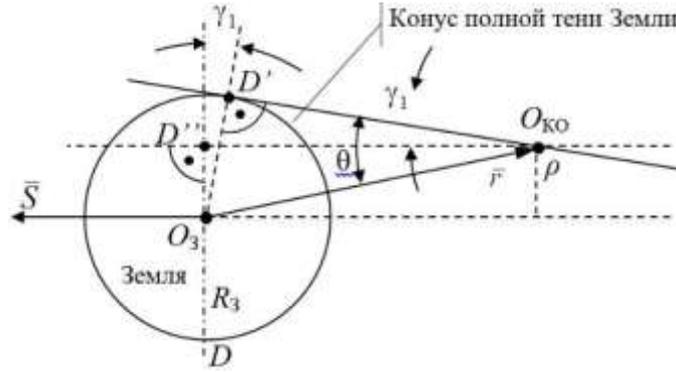


Рис. 5. Условие нахождения искусственного космического объекта на границе конической области тени Земли

С учетом того, что из треугольника $D'O_3O_{КО}$

$$\rho = r \cdot \sin(\theta - \gamma_1),$$

а из треугольника $D'O_3O_{КО}$

$$\sin \theta = \frac{R_3}{r},$$

после преобразований получается выражение

$$(\bar{r}, \bar{S}) + \cos \gamma_1 \cdot \sqrt{r^2 - R_3^2} + R_3 \cdot \sin \gamma_1 = 0. \quad (8)$$

Наконец, после подстановки (1) и (2) в (8), с учетом фиксированных склонения Солнца и долготы Солнца $\varepsilon_s = \varepsilon_s^0$; $\lambda_s = \lambda_s^0$ и несложных преобразований можно получить условие нахождения ИКО на поверхности конуса полной тени Земли:

$$\begin{aligned} & (1 - e \cdot \cos E) \cdot ((\cos \Omega \cdot \cos u - \sin \Omega \cdot \sin u \cdot \cos i) \cdot \cos \varepsilon_s^0 \cdot \cos \lambda_s^0 + \\ & + (\sin \Omega \cdot \cos u + \cos \Omega \cdot \sin u \cdot \cos i) \cdot \sin \lambda_s^0 \cdot \cos \varepsilon_s^0 + \sin u \cdot \sin i \cdot \sin \varepsilon_s^0) + \\ & + \cos \gamma_1 \cdot \sqrt{(1 - e \cdot \cos E)^2 - \frac{R_3^2}{a^2}} + \frac{R_3}{a} \cdot \sin \gamma_1 = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Воспользовавшись известным соотношением между истинной и эксцентрической аномалиями

$$\operatorname{tg} \frac{\vartheta}{2} = \operatorname{tg} \frac{E}{2} \cdot \sqrt{\frac{1+e}{1-e}}$$

и выражением синусов и косинусов через половинные углы:

$$\sin \alpha = \frac{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}}; \quad \cos \alpha = \frac{1 - \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}}{1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}},$$

из уравнения (9) можно получить уравнение прохождения ИКО по границе полной тени Земли на витке орбиты объекта относительно его истинной аномалии в следующем виде:

$$\cos \gamma_1 \cdot \sqrt{\left(1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\vartheta}{2}\right)^2 - \left(C \cdot D + C \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{\vartheta}{2}\right)^2} = \left[2A \cdot \operatorname{tg} \frac{\vartheta}{2} - B \left(1 - \operatorname{tg}^2 \frac{\vartheta}{2}\right)\right] - \left(C \cdot D + C \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{\vartheta}{2}\right) \sin \gamma_1.$$

Обозначив $x = \operatorname{tg}(\vartheta / 2)$, после достаточно громоздких преобразований получается уравнение четвертой степени:

$$a_4 \cdot x^4 + a_3 \cdot x^3 + a_2 \cdot x^2 + a_1 \cdot x + a_0 = 0, \quad (10)$$

где $a_4 = B^2 + C^2 - 1 + (\sin \gamma_1 - 2BC) \sin \gamma_1$;

$$a_3 = 4A(B - C \sin \gamma_1);$$

$$a_2 = 2(2A^2 - B^2 + C^2 D - 1 + (\sin \gamma_1 - BC(D - 1)) \sin \gamma_1);$$

$$a_1 = -4A(B + CD \sin \gamma_1);$$

$$a_0 = B^2 + C^2 D^2 - 1 + (\sin \gamma_1 + 2BCD) \sin \gamma_1.$$

Условие нахождения ИКО на границе полутеневого конуса можно найти из геометрического построения, представленного на рис. 6.

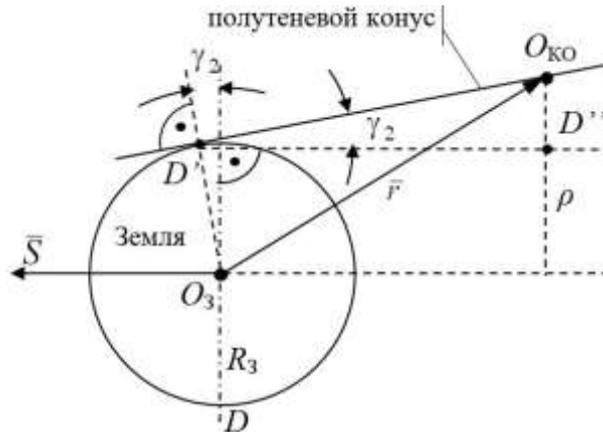


Рис. 6. Условие нахождения искусственного космического объекта на границе полутеневого конуса

По аналогии с условием (8) нахождения радиуса-вектора ИКО \bar{r} на поверхности конической тени Земли, согласно рис. 6, для поверхности полутеневого конуса можно записать:

$$(\bar{r}, \bar{S}) + \sqrt{r^2 - \rho^2} = 0.$$

Из треугольников $O_3D'O_{КО}$ и $D''D'O_{КО}$ с учетом совпадения стороны $D'O_{КО}$ можно найти

$$\rho = R_3 \cos \gamma_2 + \sqrt{r^2 - R_3^2} \cdot \sin \gamma_2.$$

Отсюда после преобразований получается выражение

$$(\bar{r}, \bar{S}) + \cos(-\gamma_2) \cdot \sqrt{r^2 - R_3^2} + R_3 \cdot \sin(-\gamma_2) = 0. \quad (11)$$

Нетрудно заметить, что выражения (8) и (11) совпадают с точностью до знака угла в тригонометрических функциях. Поэтому полученная выше формула приведенного уравнения (10) будет соответствовать также и уравнению (11), но с учетом замены угла γ_1 на угол $(-\gamma_2)$.

СЛУЧАЙ КРУГОВЫХ ОРБИТ

Для круговых орбит радиуса $R_{КО}$ основные условия (3), (8), (11) упрощаются и могут быть записаны в виде:

$$(\bar{R}_{КО}, \bar{S}) + \sqrt{R_{КО}^2 - \rho^2} = 0; R_{КО} = \text{const}.$$

Тогда для любых фигур тени (круговой конус или цилиндр) условие нахождения ИКО на поверхности фигуры принимает вид уравнения относительно аргумента широты:

$$A_1 \sin u - B_1 \cos u = C_1,$$

где $A_1 = \sin \gamma_s^0 \cdot \cos \varepsilon_s^0 \cdot \cos i - \sin i \cdot \sin \varepsilon_s^0$;

$$B_1 = \cos \gamma_s^0 \cdot \cos \varepsilon_s^0;$$

$$C_1 = \cos \gamma \cdot \sqrt{1 - \frac{R_3^2}{R_{\text{КО}}^2}} + \frac{R_3}{R_{\text{КО}}} \cdot \sin \gamma;$$

$$\gamma = \begin{cases} \gamma_1 - \text{для тени Земли;} \\ -\gamma_2 - \text{для полутени Земли;} \\ 0 - \text{для цилиндрической тени Земли.} \end{cases}$$

В результате выражения синусов и косинусов переменной u через половинные углы и обозначения $x = \text{tg}(u/2)$ получается квадратное уравнение:

$$x^2 + \frac{2A_1}{B_1 - C_1} x - \frac{B_1 + C_1}{B_1 - C_1} = 0,$$

решение которого имеет вид

$$x_{1,2} = -\frac{A_1 \pm \sqrt{A_1^2 + B_1^2 - C_1^2}}{B_1 - C_1}.$$

Очевидно, что в случае, когда дискриминант уравнения отрицателен

$$A_1^2 + B_1^2 - C_1^2 < 0, \quad (12)$$

решения уравнения не существует. Это означает, что при заданных координатах Солнца λ_s^0 , ε_s^0 ИКО не входит в тень Земли. Отсюда на основании данного условия можно найти период «бестеневой зоны» в году [9, 10]. Для расчета периода «бестеневой зоны» в году счала следует учесть, что

$$\sin \varepsilon_s = \sin \delta_s \cdot \sin u_s; \quad \cos \varepsilon_s = \frac{\cos u_s}{\cos \lambda_s}; \quad \sin \lambda_s = \frac{\text{tg } \varepsilon_s}{\text{tg } \delta_s}. \quad (13)$$

Далее, подставляя (13) в (12), с учетом выражения $\gamma_s = \Omega - \lambda_s$ и значений для коэффициентов A_1, B_1, C_1 из уравнения

$$A_1^2 + B_1^2 - C_1^2 = 0 \quad (14)$$

можно получить значения углового положения Солнца u_s , характеризующие начало и окончание «бестеневых зон».

Обозначив $x = \text{tg}(u_s/2)$, после достаточно громоздких преобразований из (14) получается уравнение четвертой степени:

$$x^4 - \frac{2b}{a - C_1} x^3 - 2 \cdot \frac{a - 2c + C_1}{a - C_1} x^2 + \frac{2b}{a - C_1} x + 1 = 0, \quad (15)$$

где $a = \sin^2 \Omega \cos^2 i + \cos^2 \Omega$;

$$b = 2(\cos \Omega \sin i \cos \delta_s - \cos i \sin \delta_s) \sin \Omega \sin i;$$

$$c = (\cos^2 \Omega \cos^2 i + \sin^2 \Omega) \cos^2 \delta_s + (2 \cos \Omega \cos i \cos \delta_s + \sin i \sin \delta_s) \sin i \sin \delta_s.$$

Оценки моментов времени начала и окончания «бестеневых зон» определяются из формулы равномерного движения Солнца по эклиптике:

$$d = \frac{365,25}{\pi} \cdot \arctg x + 80,$$

в которую необходимо вместо x подставить соответствующие решения уравнения (15).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в процессе движения ИКО по орбите вокруг Земли периодически (время от времени) могут возникать ситуации, когда объект попадает в тень освещенной Солнцем Земли. В данной ситуации временной интервал функционирования НОС определяется распределением сумеречного и ночного периодов суток, зависящих от глубины погружения Солнца под линию местного горизонта. Поэтому важной задачей при планировании работы НОС является прогнозирование продолжительности теневых участков орбиты ИКО, а также определение условий для периода «бестеневой зоны» в году.

Список используемых источников

1. *Вартаньян Ю. А., Олейников И. И., Убоженко Д. Ю.* Система контроля космического пространства как элемент стратегического сдерживания // Военная мысль. – 2015. – № 9. – С. 29–35.
2. *Благодыренко Е. В., Коробченко И. П., Мальцев Г. Н.* Ограничения наблюдения космических объектов наземными оптико-электронными системами в ночное время и в сумерки // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2021. – Вып. 680. – С. 71–76.
3. *Эльясберг П. Е.* Введение в теорию полета искусственных спутников Земли. – М. : Наука, 1965. – 539 с.
4. *Охоцимский Д. Е., Сихарулидзе Ю. Г.* Основы механики космического полета : учеб. пособие. – М. : Наука, 1990. – 448 с.
5. *Дубошин Г. Н.* Небесная механика. Аналитические и качественные методы. – М. : Наука, 1978. – 456 с.
6. *Бронштейн И. Н., Семендяев К. А.* Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов : учеб. пособие для вузов. – СПб. : Лань, 2022. – 608 с.
7. *Лаврентьев В. Г., Олейников И. И., Червонов А. М.* Основные аспекты мониторинга техногенного состояния околоземного космического пространства для обеспечения безопасности космической деятельности // Механика, управление и информатика. – 2015. – Т. 7, № 1(54). – С. 216–228.
8. *Логунов С. В., Рогов Д. А., Чистяков С. В.* Критериальные условия возможности наблюдения геостационарных спутников связи наземными оптическими средствами // Вестник воздушно-космической обороны. – 2017. – № 1. – С. 44–48.
9. *Горбулин В. И., Зозуля Л. П., Каргу Д. Л.* Оперативный расчет интервалов наблюдения заданной длительности космических аппаратов на круговых и эллиптических орбитах // Вопросы электромеханики: тр. ВНИИЭМ. – 2012. – Т. 131, № 6. – С. 19–22.
10. *Горбулин В. И., Зозуля Л. П.* Применение кватернионов для аналитического расчета интервалов наблюдения спутником заданного объекта // Информация и космос. – 2009. – № 3. – С. 62–66.

С. О. Бурлаков¹,
доктор технических наук, профессор;

М. Ю. Драгунов²;

Д. Ю. Мишин³,
кандидат технических наук;

Е. А. Новиков⁴,
доктор технических наук, доцент

^{1,2} Военная академия связи имени С. М. Буденного, г. Санкт-Петербург.

^{3,4} Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург.

МЕТОДИКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТ СПУТНИКОВОГО РЕТРАНСЛЯТОРА ДЛЯ РАБОТЫ ЗЕМНЫХ СТАНЦИЙ С ПАРЦИАЛЬНЫМИ КАНАЛАМИ

В данной статье исследуется уникальная динамика распределения частотного ресурса спутникового ретранслятора с особым акцентом на стандартную ретрансляцию для обеспечения надежной работы земных станций с частичными каналами. Представлен усовершенствованный подход к оптимизации выбора частотных диапазонов спутникового ретранслятора, который способствует росту эффективности использования его ресурсов и обеспечивает стабильность работы в условиях помеховых воздействий.

Ключевые слова: распределение частотного ресурса, спутниковый ретранслятор, наземная станция с частичными каналами, скорость передачи данных, защита от помех в спутниковом радиоканале, задача о рюкзаке.

ВВЕДЕНИЕ

В исследовании [1] рассматривается наземная станция с возможностью оперативного изменения числа каналов передачи и приема. Входной поток данных от абонентов разделяется на отдельные частичные каналы, каждый из которых обрабатывается независимо друг от друга. В работе [2] представлены усовершенствованные схемы передачи и приема данных наземной станции с частичными каналами, а также новый подход к мультиплексированию и демупльтиплексированию каналов для оптимизации процесса передачи информации.

Преимуществами наземной станции с использованием парциальных каналов обычно являются:

- рост эффективности использования частотного ресурса спутникового ретранслятора, благодаря возможности задействования его свободных диапазонов;
- возможность создания сетей спутниковой связи в стволе без использования управления от центральной наземной станции;
- повышение устойчивости спутниковых линий радиосвязи за счет использования передачи данных в нескольких каналах одновременно или использования различных маршрутов передачи и приема частичных каналов на свободных частотах.

Недостатками наземной станции с частичными каналами обычно являются:

- рост сложности оборудования, который обычно компенсируется с помощью цифровых методов обработки сигналов;
- сложность процесса первоначальной установки связи и последующего обмена данными, который можно минимизировать путем автоматизации этих процессов;
- необходимость внедрения системы слежения за наличием сигналов и помех в стволе наземной станции с частичными каналами.

В статье рассматривается проблема распределения частотного ресурса частичных каналов, предлагаются варианты реализации схемы спутниковой связи с частичными каналами и метод распределения частот частичных каналов при их использовании.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТНОГО РЕСУРСА СПУТНИКОВОГО РЕТРАНСЛЯТОРА

Пусть в полосе частот ствола ретранслятора $\Delta f_{\text{ств}}$ работают земные станции (ЗС), между соседними сигналами которых имеются M незанятых частотных полос (рис. 1). Каждая i -я частотная полоса ($i = 1 \dots M$) характеризуется набором параметров $(f_i, \Delta f_i, p_{\text{ш}i})$, где f_i – центральная частота, Δf_i – частотная ширина, $p_{\text{ш}i}$ – мощность шума.

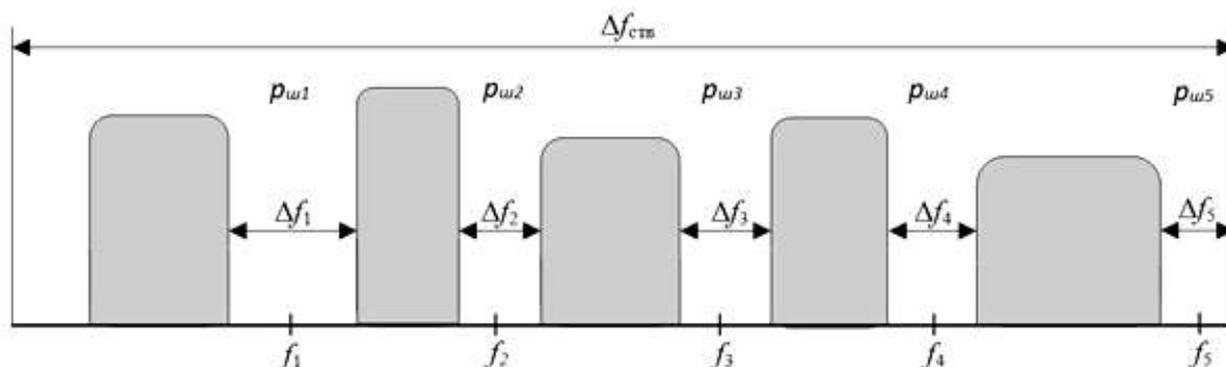


Рис. 1. Загрузка ствола космического аппарата связи

Необходимо организовать адреса дуплексной спутниковой связи между N абонентами. Каждая пара абонентов образует дуплексный канал спутниковой связи, в котором требуемая скорость передачи данных, обозначаемая V_i^* и V_i соответственно, реализуется i -й ЗС. В образуемых каналах связи скорости передачи и приема данных могут быть различными. Поэтому для корреспондирующих i -й и j -й ЗС возможны две ситуации: $V_i^* = V_j^*$, $V_i^* \neq V_j^*$ (рис. 2).

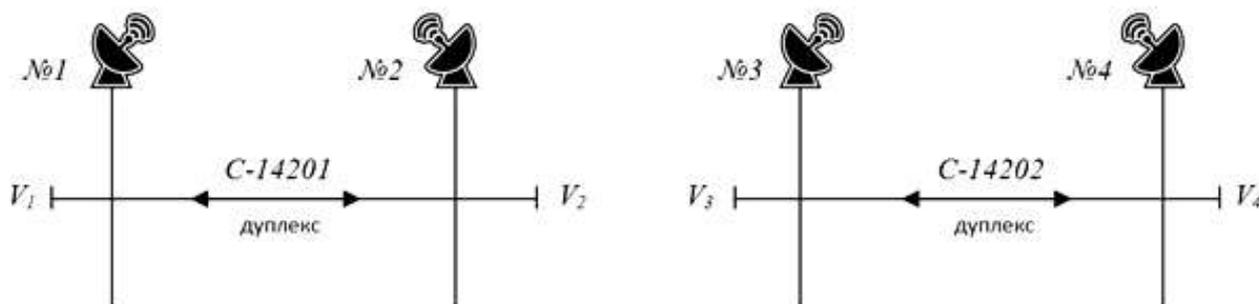


Рис. 2. Вариант схемы спутниковой связи

Согласно логике работы ЗС с соответствующими абонентами, каждый дуплексный канал реализуется несколькими частичными каналами, каждый из которых имеет свой собственный тракт передачи и приема (рис. 3) и характеризуется набором параметров: $V_{i,j}$, $f_{i,j}$, $P_{i,j}$, $Mod_{i,j}$, $Kod_{i,j}$, где i – номер ЗС ($i=1 \dots N$); j – номер парциального канала ($j=1 \dots L_i$, где L_i – количество парциальных каналов i -й ЗС): $V_{i,j}$ – входная абонентская скорость передачи парциального канала; $f_{i,j}$ – частота несущей радиосигнала; $P_{i,j}$ – мощность радиосигнала; $Mod_{i,j}$ – модуляция радиосигнала; $Kod_{i,j}$ – вид и параметры помехоустойчивого кодирования.

Распределение частотного ресурса спутникового ретранслятора между ЗС с соответствующими абонентами должно учитывать требования к качеству канала связи и скорости передачи данных земной станции. Требования $p_{\text{ош } i,j} \leq p_{\text{ош}}^*$ к качеству каналов связи определяются вероятностью битовой ошибки $p_{\text{ош } i,j}$ на выходе каждого из них и формализуются системой из $N \cdot L_N$ неравенств:

$$p_{\text{ош } i,j} \leq p_{\text{ош}}^*, \quad i = 1 \dots N, \quad j = 1 \dots L_i, \quad (1)$$

где L_i^* – максимально допустимое количество парциальных каналов i -й ЗС.

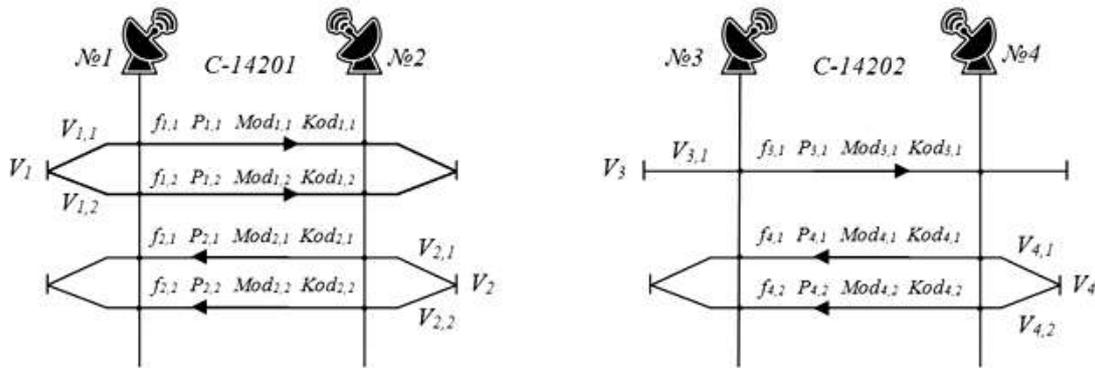


Рис. 3. Вариант реализации схемы спутниковой связи ЗС с ПК

Требования к скорости передачи ЗС задаются системой из N неравенств:

$$\sum_{j=1}^{L_i} V_{i,j} = V_i^*, \quad L_i \leq L_i^*, \quad i = 1 \dots N. \quad (2)$$

При распределении частотного ресурса необходимо как можно плотнее упаковывать имеющийся частотный ресурс ретранслятора сигналами ЗС с ПК, что формализуется целевой функцией

$$\left[\sum_{i=1}^M \Delta f_i - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{L_i} \Delta f_{i,j} \right] \xrightarrow{f_{i,j}, \Delta f_{i,j}} \max. \quad (3)$$

Зависимости $p_{\text{ош } i,j}$ и $\Delta f_{i,j}$ от $V_{i,j}$, $f_{i,j}$, $P_{i,j}$, $Mod_{i,j}$, $Kod_{i,j}$ определяются известными выражениями, описанными в работе [3].

В данной постановке задачи действительно присутствует множество переменных. Однако для упрощения решения и учета всех возможных параметров предлагается использовать методы математического моделирования и оптимизации. Это позволит учесть все необходимые параметры и выбрать наилучшее распределение частотного ресурса для обеспечения максимальной эффективности работы земных станций с парциальными каналами, при этом парциальная мощность на выходе усилителя зависит от распределения абонентских скоростей каналов [1]:

$$P_{\text{вых } i,j} = P_{\text{ум } i} \frac{V_{i,j}}{\sum_{j=1}^{L_i} V_{i,j}}, \quad (4)$$

где $P_{\text{ум } i}$ – мощность усилителя мощности i -й ЗС.

При изменении $V_{i,j}$ меняется $\Delta f_{i,j}$. При этом спектральная плотность мощности излучаемого сигнала согласно (4) не меняется, что при одинаковом $p_{шi}$ не меняет $h_{i,j}^2$ на входе парциального приемника. Таким образом, качество парциального канала можно менять только выбором параметров кодирования, что, в свою очередь, также меняет $\Delta f_{i,j}$.

МЕТОДИКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТ СПУТНИКОВОГО РЕТРАНСЛЯТОРА ДЛЯ РАБОТЫ ЗЕМНЫХ СТАНЦИЙ С ПАРЦИАЛЬНЫМИ КАНАЛАМИ НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ О ЗАПОЛНЕНИИ РЮКЗАКА

Алгоритм рюкзака является алгоритмом, который оптимизирует использование доступных ресурсов и обеспечивает эффективную работу спутникового ретранслятора. Такой подход позволяет увеличить пропускную способность системы связи и обеспечить надежную передачу данных между земными станциями и спутником:

$$\sum_{i=1}^M \Delta f_i \geq N \cdot L_i \cdot \Delta f_{i,j}. \quad (5)$$

Один из способов распределения частотного ресурса – полный перебор всех возможных подмножеств из n элементов. Такой подход позволяет найти все комбинации распределения сигналов земных станций по незанятым полосам частот. Однако этот метод может быть неэффективным, особенно если количество элементов велико. Это связано с тем, что количество подмножеств растет экспоненциально с увеличением 2^n . Цель состоит в том, чтобы найти подмножество, которое максимально удовлетворяет всем условиям задачи и минимизирует затраты на заполнение частотного диапазона. Метод полного перебора всех подмножеств может быть эффективным, если количество элементов невелико. Но при большом количестве элементов он становится непрактичным. В таких случаях можно использовать алгоритмы оптимизации и методы динамического программирования, чтобы найти оптимальное решение $\sum_{i=1}^M \Delta f_i$.

Есть две возможности распределения сигналов по частотным полосам при использовании первых i сигналов: задействовать данную полосу или нет. Если не задействовать, то в этом случае

$$F(i, \sum_{i=1}^M \Delta f_i) = F(i-1, \sum_{i=1}^M \Delta f_i). \quad (6)$$

Если задействовать (при соблюдении условия (5)), то останется свободная вместимость $\Delta f_i - \Delta f_{i,j}$, которую можно будет заполнить первыми $i-1$ сигналами, следовательно

$$F(i, \sum_{i=1}^M \Delta f_i) = F(i-1, \sum_{i=1}^M \Delta f_i - \Delta f_{i,j}). \quad (7)$$

Из двух предложенных вариантов выбирается тот, который соответствует заданному условию (3).

После выполнения алгоритма вы получите набор возможных вариантов развертывания. Эти варианты необходимо оценить на основе целевой функции. Она может включать в себя такие параметры, как качество канала связи, скорость передачи данных, эффективность использования частотного ресурса и другие факторы, важные для вашей задачи. Проанализировав полученные данные, вы сможете выбрать вариант, который наилучшим образом соответствует вашим целям и требованиям (3).

Дополнительные ограничения на распределение частотного ресурса могут включать в себя такие параметры как ширина полосы частот, уровень мощности, тип модуляции, кодирование и другие. Эти ограничения необходимы для обеспечения совместимости различных земных станций, минимизации интерференции и поддержания требуемого качества связи. В случае введения дополнительных ограничений задача распределения частотного ресурса становится более сложной. Для ее решения требуются более сложные алгоритмы и методы оптимизации. Рассмотрим частотные полосы M , которые выступают в качестве «рюкзака» с ограничением b^* на возможный максимальный «вес» предметов в нем и множество предметов n . Добавим ограничение: в рюкзак можно поместить только d^* типы предметов из n возможных, $d^* \leq n$. Каждый i -й тип предметов ($i = 1, 2, \dots, n$) определяется своими характеристиками: a_i , c_i и x_i . Требуется получить рюкзак при выполнении ограничений и условия (3).

Для формализации постановки задачи введем в рассмотрение набор булевых переменных x_i , $i = 1, 2, \dots, n$: $x_i = 1$, если хотя бы один предмет i -го типа помещен в рюкзак, и $x_i = 0$, если ни одного предмета i -го типа в рюкзаке нет. Число возможных типов предметов в рюкзаке ограничено условием

$$\sum_{i=1}^n x_i \leq d^*. \quad (8)$$

Необходимо максимизировать стоимость предметов в рюкзаке:

$$c_1 x_1 + c_2 x_2 + \dots + c_n x_n \rightarrow \max \quad (9)$$

при ограничении

$$a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n \leq b^*. \quad (10)$$

Используя идеи динамического программирования, рассмотрим множество задач типа (8)–(10).

При $d = 1$ решается задача отыскания максимума (9) при использовании только предметов одного типа i , $1 \leq i \leq n$, для заполнения виртуальных рюкзаков с максимальными суммарными весами предметов b ($0 \leq b \leq b^*$):

$$f_1(b) = \max(c_i x_i) \quad (11)$$

при ограничениях для каждого выбираемого значения x_i и b , удовлетворяющих условию

$$a_i x_i \leq b. \quad (12)$$

Найденные значения максимумов $f_1(b)$ обозначим для дальнейшего использования как $f_1(\Delta b)$, где $\Delta b = b$, $0 \leq b \leq b^*$, $0 \leq \Delta b \leq b^*$. Для получения максимума (9) при наполнении рюкзака не более чем двумя типами предметов, т. е. при $d = 2$, будем считать, что часть вместимости рюкзака Δb будет выделяться для наполнения вторым типом предметов. Конкретный номер типа предмета будут определяться для каждого виртуального рюкзака вместимостью b из выражения

$$f_2(b) = \max(c_i x_i + f_1(b - \Delta b)) = \max(c_i x_i) + f_1(b - \Delta b) \quad (13)$$

при ограничениях:

$$1 \leq i \leq n, 0 \leq \Delta b \leq b, 0 \leq b \leq b^*, a_i x_i \leq \Delta b. \quad (14)$$

В выражении (13) соотношение $f_1(b - \Delta b)$ представляет собой уже найденное в соответствии с выражением (8) максимальное значение стоимости рюкзака вместимостью $b - \Delta b$ при его наполнении экземплярами только одного типа предметов при выполнении (11) и

(12). Это максимальное значение складывается со значением c , где тип предмета i выбирается из множества $\{1, 2, \dots, n\}$, и количество экземпляров этого типа определяется для каждой вместимости рюкзака Δb , где $0 \leq \Delta b \leq b$ при выполнении ограничений (14).

Для получения максимума двух слагаемых, одно из которых имеет фиксированное значение, нужно выбрать предмет типа i , который дает максимальное значение $c_i x_i$ при вместимости виртуального рюкзака Δb и $a_i x_i \leq \Delta b$. В соответствии с выражением (11) такое значение уже было определено и обозначено как $f_1(\Delta b)$. Следовательно, выражение (13) можно записать так

$$f_2(b) = \max(f_1(\Delta b) + \max(c_i x_i) + f_1(b - \Delta b)) \quad (15)$$

при $0 \leq \Delta b \leq b$, $0 \leq b \leq b^*$.

Продолжая процесс, получим рекуррентное уравнение относительно числа типов предметов, используемых при заполнении гипотетических рюкзаков

$$f_d(b) = \max(f_1(\Delta b) + f_{d-1}(b - \Delta b)) \quad (16)$$

для всех $0 \leq \Delta b \leq b$, $0 \leq b \leq b^*$, $d = 2, 3, \dots, d^*$.

Повышение помехоустойчивости радиолиний с ЗС достигается путем дублирования передаваемой информации по незанятым частотным полосам или распределения трактов передачи и приема парциальных каналов по незанятым частотам, что планируется в ходе выделения M частотных полос.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методика распределения частотного ресурса спутникового ретранслятора, предложенная в статье, позволяет достичь нескольких целей. Во-первых, она увеличивает эффективность использования частотного ресурса, позволяя задействовать незанятые полосы частот. Во-вторых, она повышает помехоустойчивость радиолиний за счет дублирования передаваемой информации или распределения маршрутов передачи и приема частичных каналов на разных частотах. Наконец, данная методика позволяет создавать сети спутниковой связи, используя парциальные каналы в качестве отдельных направлений связи.

Список используемых источников

1. Цветков К. Ю., Бурлаков С. О., Климов И. С. Распределение частот ретранслятора связи при работе земных станций с парциальными каналами // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2020. – Вып. 672. – С. 88–91.
2. Пат. 2307465 Российская Федерация. Устройство регулирования мощности передачи земной станции спутниковой связи / Бурлаков С. О., Брыдченко А. В. [и др.]. – № 2006117930/09; заявл. 24.05.2006; опубл. 27.09.2007, Бюл. № 27. – 5 с.
3. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение : пер. с англ. – 2-е изд. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2003. – 560 с.
4. Махов Д. С., Шумбар А. В. Модель перераспределения параметров парциальных радиоканалов воздушного робототехнического средства с многолучевой фазированной антенной решеткой // Вопросы оборонной техники. Сер. 16: Технические средства противодействия терроризму. – 2023. – № 7-8 (181-182). – С. 3–8.

А. С. Вылков¹;
А. С. Мелихов²

¹ Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного, г. Санкт-Петербург.

² Пермский военный институт войск национальной гвардии Российской Федерации, г. Пермь.

ОБОБЩЕННАЯ МОДЕЛЬ ПОРАЖЕНИЯ ТЕХНИКИ СВЯЗИ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОТИВНИКОМ ОБЫЧНОГО ОРУЖИЯ

Представлено содержательное описание воздействия средств поражения противника на технику связи военного назначения. Рассмотрена возможная реализация модели поражения с использованием метода конечных элементов численного моделирования. Представлен поэтапный порядок расчета характеристик осколочного поля. Сформированы внешние признаки боевых повреждений подвижных аппаратных, обеспечивающих связь, рассмотрена взаимосвязь между ударным воздействием осколочных элементов с различными характеристиками и глубиной проникания осколков в образец техники связи военного назначения в зависимости от ее построения.

Ключевые слова: осколочное поле, метод конечных элементов, подвижная техника связи, численное моделирование, обычное оружие.

ВВЕДЕНИЕ

Проведенный анализ ведения боевых действий показывает массовое применение обычного оружия. К обычному оружию относят оружие, боеприпасы и средства поражения которого снаряжаются бризантными или горючими веществами [1, 2]. Анализ применения оружия противником в ходе специальной военной операции показал, что, несмотря на развитие в области технологий проектирования и создания перспективных средств поражения, значительную долю составляют артиллерийские системы различного калибра. В приоритетном порядке огневому воздействию подвергаются в первую очередь органы управления, центры принятия решений.

Техника связи военного назначения (ТС ВН), составляющая техническую основу системы управления, подвержена значительному огневому воздействию со стороны противника. Последствиями применения оружия являются боевые повреждения, представляющие собой следы воздействия осколков (пробоины, деформации) на корпусах ТС ВН. В зависимости от расстояния подрыва боеприпасов до цели, осколочные поля имеют различные характеристики скорости, и как следствие, различное проникающее действие в радиоэлектронную аппаратуру. Следы осколочного воздействия могут быть как явными (сквозными), так и неявными (слепыми). Внешние повреждения при достаточной степени изученности могут являться диагностическими признаками, по которым возможно предварительно оценить степень полученных повреждений. Данная информация может использоваться в целях определения предварительного объема ремонтных работ по замене узлов и блоков, что могло бы сократить время, затраченное на организационные потери при предварительном определении вида ремонта.

Ввиду отсутствия информации о характерах повреждений и их взаимосвязи с поставленными техническими диагнозами, данное исследование можно считать актуальным. Новизной поставленной научной задачи является определение для ТС ВН диагностических внешних признаков, которые позволят проводить предварительную дефектацию без разбора ее блоков в условиях дефицита времени, выделенного для предварительной оценки технического состояния после воздействия противника.

Для оценки степени поражения военной техники связи (ВТС) ранее проводились исследования данного вопроса с использованием различных методов. В работе [3] степень повреждения аппаратной определялась на основании методов имитационного моделирования.

Повреждение осколочным полем блоков определялось исходя из математического аппарата теории вероятностей. В работе [4] предварительная оценка степени повреждений решалась с помощью распознавания образов, при сравнении фактического состояния (положения) на местности поврежденных аппаратных с эталонными образцами. Данные исследования проводились для решения задач по определению состава комплектов на восстановление техники связи, для определения рационального маршрута движения и эвакуации поврежденной ТС ВН.

В рамках данной работы модель поражения ТС ВН в результате применения противником обычного оружия предназначена для получения зависимости между характеристиками воздействующих поражающих элементов и глубиной проникновения в аппаратную.

СОДЕРЖАТЕЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ СРЕДСТВ ПОРАЖЕНИЯ ПРОТИВНИКА НА ТЕХНИКУ СВЯЗИ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Требуется получить зависимость величины пробоин μ в корпусе аппаратной связи от размеров S_i , массы m_i и глубины проникания $l_{пр}$ осколков (количества пробитых преград). Преграды представляют собой стенки корпусов кузова-фургона и аппаратуры, размещенной внутри. Математическая постановка задача представлена выражением

$$\mu = f\{S_i, l_{пр}, m_i\}. \quad (1)$$

С целью решения поставленной задачи необходимо описать процесс огневого воздействия противника, а также определить основные параметры, влияющие на конечный результат поражения.

Основные факторы, влияющие на объем пораженных узлов и блоков аппаратной связи, сгруппируем и рассмотрим по трем направлениям:

- характеристики используемых боеприпасов, вооружения;
- характеристики формируемых осколочных полей;
- стойкость техники к внешнему воздействию.

Каждый из применяемых боеприпасов характеризуется следующими основными параметрами [1, 2]:

- а) массой боеприпаса;
- б) массой взрывчатого вещества;
- в) толщиной стенок боеприпаса, материалом корпуса из которого он изготовлен;
- г) коэффициентом наполнения;
- д) скоростью детонации.

Структура боеприпаса и его конструктивное исполнение влияют на эффективность поражения цели. Применяемые боеприпасы по физической природе действия по цели можно разделить на осколочные, осколочно-фугасные, фугасные, фугасно-зажигательные, кумулятивные. Самыми массовыми боеприпасами являются осколочные (осколочно-фугасные). К основным поражающим факторам относятся осколочное действие и ударная взрывная волна (УВВ). С точки зрения практики можно отметить, что характеристики УВВ остаются наиболее весомыми на незначительном расстоянии от места подрыва, в то время как осколочное поле может эффективно воздействовать на расстояниях в несколько десятков метров. Поражающие элементы, которые размещаются в боеприпасах, могут быть трех типов: осколки естественного дробления; осколки заданного дробления; осколки в виде готовых поражающих элементов.

Подрыв боеприпасов характеризуется дроблением корпуса на большое число осколков. Эмпирическим путем получен ряд выражений, описывающих общее число полученных элементов.

Для оценки количества осколков естественного дробления, массой более 1 г, применяется формула Юстрова:

$$N = \beta_0 \frac{m_{\text{ВВ}}}{d} \frac{\sigma_y}{\sigma_B \delta} \frac{\chi^2 + 0,5}{\chi^2 - 1}, \quad (2)$$

где β_0 – коэффициент, зависящий от свойств ВВ (для тротила 46, для аммотола 30);
 $m_{\text{ВВ}}$ – масса ВВ, г;
 d – калибр снаряда, см;
 σ_y – предел упругости материала корпуса, МПа;
 σ_B – предел прочности материала корпуса, МПа;
 χ – коэффициент, зависящий от конструкции оболочки (для оболочек с коэффициентом заполнения $\alpha = 0,07$; 0,1 и 0,15 коэффициент χ равен 1,8; 1,5; и 1,4 соответственно);
 δ – относительное удлинение материала корпуса, %.

Количество осколков заданного дробления или готовых поражающих элементов определяется по выражению

$$N = \frac{M \cdot 10^{-3}}{m} \eta_m (1 - \mu_d - \alpha), \quad (3)$$

где μ_d – относительная масса доньев;
 η_m – относительный выход металла в осколки;
 M – масса корпуса;
 m – масса взрывчатого вещества;
 α – коэффициент заполнения.

Помимо общего количества осколков, на способность поражения оказывают значительное влияние также масса осколка и параметр формы:

$$m_{\text{ср}} = \frac{M}{N_{>m_s}}; \quad \Phi = \frac{\bar{S}}{V^{2/3}}, \quad (4)$$

где $m_{\text{ср}}$ – средняя характеристическая масса;
 $N_{>m_s}$ – общее количество осколков с массой, большей нижней границы спектра;
 \bar{S} – средний мидель осколка;
 Φ – параметр формы;
 $V^{2/3}$ – объем осколка.

Реальный диапазон значений параметра формы осколков естественного дробления составляет $\Phi = 1,8 \dots 2,2$.

Подрыв осколочных боеприпасов осуществляется на некотором расстоянии от цели. Конструктивным построением боеприпасов определен принцип формирования осколочного поля, которое может иметь осевую или сферическую симметрию. Для случаев осевой и сферической симметрии выведены эмпирические зависимости для максимальной скорости, получаемой осколками. Данные выражения известны как формулы Покровского – Гарни:

– для осевой симметрии

$$V_0 = 0.5D \sqrt{\frac{\alpha}{2 + \alpha}}; \quad (5)$$

– для сферической симметрии

$$V_0 = 0.5\varphi_0 D \sqrt{\frac{5\alpha}{10-4\alpha}}, \quad (6)$$

где α – коэффициент наполнения взрывчатого вещества;

D – скорость детонации заряда взрывчатого вещества.

Подрыв осколочного боеприпаса создает ударную взрывную волну и осколочное поле. Осколочное поле описывается угловыми значениями границ γ (передние и задние углы поля), результирующей динамической скоростью осколков v_d , динамической плотностью поля Π_d , а также угловыми границами сектора разлета на местности ξ .

Ударная взрывная волна характеризуется избыточным давлением во фронте Δp_ϕ и определяется выражением

$$\Delta p_\phi = 0,95 \frac{\sqrt[3]{m}}{r} + 3,9 \frac{\sqrt[3]{m^2}}{r^2} + 13,0 \frac{m}{r^3}, \quad (7)$$

где r – расстояние от места подрыва до цели;

m – масса заряда ВВ.

В соответствии с законами баллистики, при прохождении расстояния скорость осколков уменьшается в зависимости от пройденного расстояния. При подходе к цели значение скорости осколков отличается от начальной результирующей скорости v_d .

Взаимодействие осколков с целью реализуется на основании трех различных концепций:

- толщинно-пробивной концепции;
- критериальной концепции;
- синтетической концепции.

В дальнейшем основной механизм пробитий будет рассматриваться только с учетом толщинно-пробивной концепции. Важным параметром данного механизма взаимодействия осколков и преграды является толщина пробиваемой конечной преграды $b_{\text{пред}}$.

Помимо указанных характеристик боеприпасов, осколочных полей, осколков, влиять на параметр пробития преграды определенной толщины будет и способность ТС ВН противостоять механическим воздействиям. Данная способность выражается значениями стойкости, которые задаются при проектировании ТС ВН на основании общих технических требований и определяются материалами, используемыми при построении военной техники.

Эмпирические зависимости также разработаны и выведены для оценки пробивного действия осколков. Однако разработанные выражения представлялись только для одиночных преград. В то же время все реальные цели могут представлять собой набор разнесенных преград, а действие осколков по разнесенным преградам сопровождается более сложными физическими процессами, которые не могут уложиться в значения эмпирических формул, ввиду возможной разнородности преград.

Таким образом, рассмотрение вопросов проникания осколков в преграды, представляющие построение аппаратной связи, и есть главная задача исследования в рамках разработки модели поражения ТС ВН. Характеристики же боеприпасов и осколочных полей необходимы для определения основных параметров осколков и значений скоростей при встрече с целью.

Очевидно, что без знания прочностных характеристик ТС ВН, их анализа, нельзя решить главную задачу данного исследования – рассмотрение механизмов пробития набора преград.

Направлений решения может быть два: экспериментальный метод и численное моделирование с использованием метода конечных элементов (МКЭ).

Экспериментальные методы заключаются в проведении натурных испытаний. Результаты впоследствии обрабатываются методами математической статистики. Однако необходим

громоздкий и дорогостоящий эксперимент. Альтернативным решением эксперименту является проведение численного моделирования. Ведущую роль в прочностном анализе занимает метод конечных элементов (МКЭ), с помощью которого возможно оценить механику взаимодействия двух твердых тел на основании решения динамической задачи удара.

Метод конечных элементов основан на соотношениях теории упругости. Главное соотношение, относительно которого решается задача, носит название закона Гука в теории упругости:

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (8)$$

где σ – напряжения;
 E – модуль упругости материала;
 ε – деформации.

Разность перемещений двух соседних точек вызывает деформации в материале и связанные с ним напряжения.

Для решения задачи методом конечных элементов необходимы [1]:

- физические модели поведения материалов в условиях приложенных нагрузок;
- корректное математическое описание поведения приложенных нагрузок в виде формул, математических уравнений;
- численные методы решения сложных математических уравнений.

МОДЕЛЬ ПОРАЖЕНИЯ ТЕХНИКИ СВЯЗИ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ПРОТИВНИКОМ ОБЫЧНОГО ОРУЖИЯ

Решение задачи определения зависимости количества пробитых преград от приложенного внешнего воздействия представлено в виде блок-схемы (рис. 1).

В блоке 1 вводятся исходные данные о характеристиках средств поражения, которые включают в себя:

- массовые показатели боеприпаса;
- значения плотности материала осколка;
- скорость падения снаряда.

В блоке 2 значения начальной скорости осколков V_0 рассчитываются по выражениям (5) и (6), площади проекции осколков, значения параметра формы, массовые характеристики осколков – по выражению (4), общее количество осколков – по выражениям (2) и (3).

В блоке 3 рассчитываются значения затухания скорости осколка в зависимости от расстояния по формуле

$$v = v_0 e^{-Ax}. \quad (9)$$

Здесь v_0 – начальная скорость осколка;
 A – баллистический коэффициент осколка,

$$A = \frac{\rho_B c_x \Phi}{2\rho_M^{2/3} m^{1/3}},$$

где ρ_B – плотность воздуха;
 Φ – параметр формы;
 c_x – коэффициент лобового сопротивления;
 ρ_M – плотность материала осколка;
 m – масса осколка;

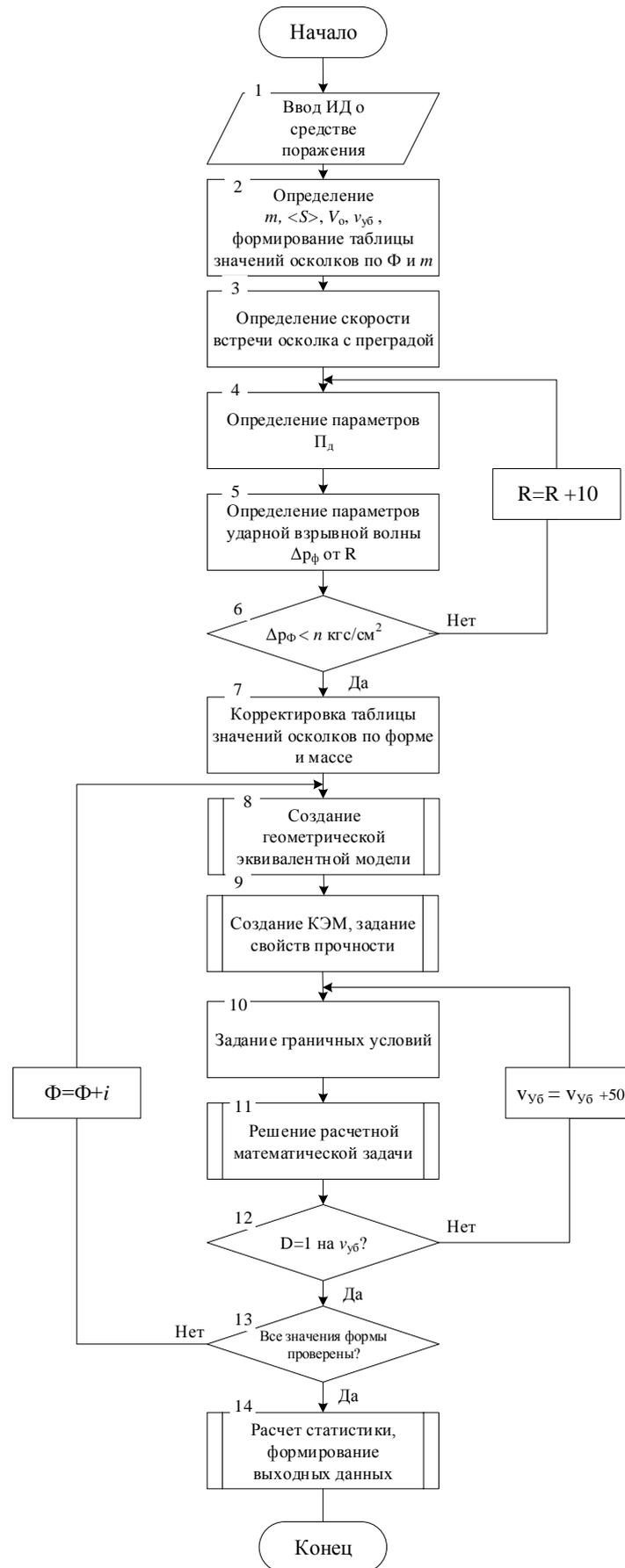


Рис. 1. Блок-схема моделирования поражения ТС ВН

В блоке 4 рассчитывается значение плотности осколочного поля для расстояний r :

$$P_D = \frac{N}{S_{\text{сп}}}, \quad (10)$$

где N – число поражающих элементов;

$S_{\text{сп}}$ – площадь поверхности сферического пояса,

$$S_{\text{сп}} = 2\pi r^2 (\cos \gamma_1 - \cos \gamma_2).$$

В блоке 5 рассчитывается значение избыточного фронта ударной взрывной волны по выражению (7), в зависимости от расстояния r подрыва боеприпаса до цели.

В блоке 6 сравнивается расчетное значение избыточного давления во фронте ударной волны $\Delta p_{\text{ф}}$ со значением, указанным в требованиях по стойкости. В случае превышения расчетного значения изменяется значение расстояния, производится расчет для нового расстояния.

В блоке 7 происходит корректировка таблицы расчетных данных, удаляются значения для расстояний, не удовлетворяющих требованию блока 6.

В блоке 8 создается геометрическая эквивалентная модель преград, представляющая собой набор разнесенных пластин, обозначающих приборные корпуса аппаратной связи. Ударник, имитирующий осколок, задается в виде параллелепипеда (куба) в соответствии с проекционными расчетными значениями для осколков.

В блоке 9 геометрическая модель преобразуется в конечно-элементную модель (КЭМ), поверхность твердых тел преобразуется в конечные 3D элементы, представляющие собой прочностной твердотельный элемент с восемью узлами (куб).

Твердотельным элементам задается параметр плотности для соответствующего материала и коэффициент Пуассона. В соответствии с проведенным анализом научно-технической литературы [5, 6] для материала задается модель упругопластического деформирования Джонсона – Кука, которая совместно с уравнением состояния Грюнайзена используется для описания всестороннего равномерного сжатия-растяжения пластин.

Модель упругопластического деформирования описывает кривую деформирования материала:

$$\sigma_{\text{эк}} = (A + B\varepsilon_p^n) \left(1 + c \ln \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \left(1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right), \quad (11)$$

где ε_p – действующие пластические деформации;

T – температура материала в процессе взаимодействия;

T_r – температура окружающей среды;

T_m – температура плавления алюминиевого сплава;

$A, B, c,$

n, m, ε_0 – параметры модели; точки над переменной обозначают производную по времени (скорость).

Для описания разрушения модели материала Джонсона – Кука используется модель, согласно которой разрушение конечного элемента происходит, когда параметр поврежденности $D = 1$:

$$D = \frac{1}{\varepsilon_f} \sum_i \Delta \varepsilon_p^i. \quad (12)$$

Здесь $\Delta \varepsilon_p^i$ – приращение пластической деформации в конечном элементе на i -ом шаге интегрирования по времени;

ε_f – деформация разрушения, определяемая выражением

$$\varepsilon_f = \left(D_1 + D_2 \exp \left(D_3 \frac{p}{\sigma_{ef}} \right) \right) \left(1 + D_4 \ln \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_0} \right) \left(1 + D_5 \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right), \quad (13)$$

где D_1, \dots, D_5 – параметры материала;
 σ_{ef} – действующее напряжение;
 p – давление в рассматриваемом конечном элементе.

Также необходимо учесть и уравнение состояния материала:

$$p = \begin{cases} \frac{\rho_0 C^2 \mu \left(1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{\alpha}{2} \mu^2 \right)}{\left[1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^2} + (\gamma_0 + a \mu) E, & p > 0; \\ \rho_0 C^2 \mu (\gamma_0 + a \mu) E, & p < 0 \end{cases} \quad (14)$$

где ρ_0 – начальная плотность;
 C – объемная скорость звука;
 μ – относительное изменение объема, $\mu = \rho_0 / \rho - 1$;
 γ_0 – коэффициент Грюнайзена;
 a – коэффициент, характеризующий наклон графика зависимости коэффициента Грюнайзена от объема;
 S_i – коэффициент наклона графика ударной адиабаты;
 E – внутренняя энергия, отнесенная к начальному объему.

Механические характеристики используемых материалов задаются из соответствующих справочников.

В блоке 10 задаются граничные условия, включающие в себя скорость ударника, в соответствии с ранее проведенными расчетами, а также время расчета, определяемое по выражению

$$t = \frac{L}{v}, \quad (15)$$

где t – время прохождения осколком сквозь преграды;
 L – расстояние, вычисляемое как сумма толщины пластин и длины осколочного элемента;
 v – скорость осколочного элемента в момент встречи с целью.

В блоке 11 производится решение составленных уравнений по следующему алгоритму (рис. 2).

Основная система уравнений МКЭ принимает вид

$$K(u)u = f. \quad (16)$$

Матрица жесткости сама является функцией вектора решения, значение u является перемещениями под воздействием силы. Исходя из этого, процесс решения строится следующим образом:

1) строится матрица жесткости, исходя из предположения, что вектор перемещений равен нулю: $K_0 = K(0)$, и решается линейная система $K_0 u_1 = f$;

2) найденное первое приближение u_1 используется для построения уточненной матрицы жесткости $K_1 = K(u_1)$ и из решения системы находится новое приближение решения – u_2 ;

3) вновь уточняется матрица жесткости $K_2 = K(u_2)$ и решается система $K_2 u_3 = f$.

Сравнение значений шага времени производится на каждом расчетном шаге со временем, заданным по выражению (15). При достижении максимального шага времени решение прекращается.

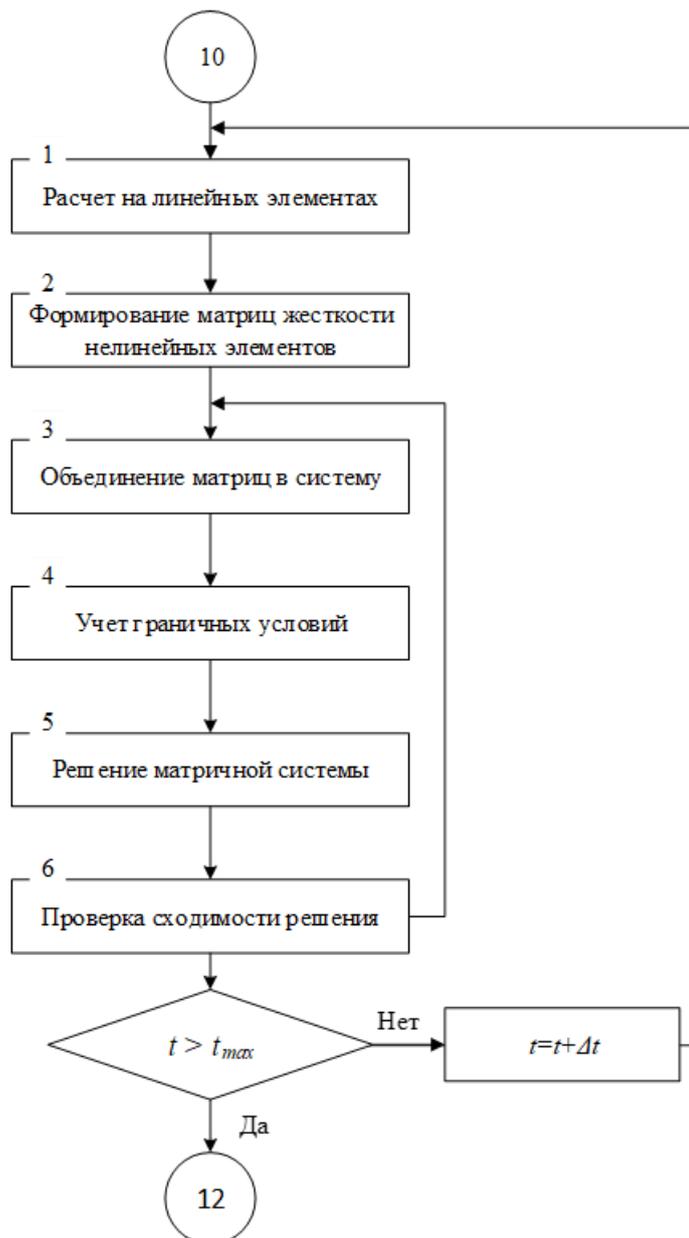


Рис. 2. Блок-схема решения расчетной математической задачи

В блоке 12 проверяется условие по разрушению последней заданной преграды для выбранного значения параметра формы и скорости. Если последняя преграда не пробита, производится увеличение скорости ударника. При пробитии последней заданной преграды, в блоке 13 осуществляется изменение параметров формы и массы для расчета нового значения ударника. Так проверяется каждая характеристика параметра формы осколка при различных значениях скорости.

В блоке 14 обобщаются статистические данные о количестве пробитых преград $l_{пр}$, имитирующих стенки корпусов аппаратуры связи, отмечаются значения скорости v , массы m , параметра формы осколка Φ (его проекции S_i).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная модель поражения ТС ВН позволяет решить поставленную задачу о пробитии преград и получении зависимостей для внешних повреждений аппаратных связей. Эквивалентная замена набором преград производится с учетом используемых материалов корпусов ТС ВН согласно требованиям нормативно-технической документации. Данный подход к построению модели поражения, на основании методов численного моделирования, в рассматриваемой области применен впервые, и в отличие от известных моделей использует прочностные характеристики материалов, из которых изготавливаются средства связи.

Проведенные исследования позволяют рассматривать в дальнейшем зависимости плотности осколочного поля, скорости осколков, и глубину их поражающего действия для проведения предварительной оценки объема ремонта ТС ВН, получившей боевые повреждения.

Список используемых источников

1. Балаганский И. А., Мерзневский Л. А. Действие средств поражения и боеприпасов : учебник. – Новосибирск : НГТУ, 2017. – 408 с.
2. Боеприпасы : учебник: в 2 т. / под общ. ред. В. В. Селиванова. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. – Т. 1. – 506 с.
3. Воловиков В. С. Методическое обеспечение формирования комплектов военно-технического имущества связи, как инструмент повышения эффективности функционирования системы восстановления техники связи и автоматизированных систем управления // Системы управления, связи и безопасности. – 2015. – № 1. – С. 37–52.
4. Семенов С. С., Педан А. В., Смолеха А. В. Применение технологии распознавания образов как инструмент решения задач технической разведки техники связи и автоматизированных систем управления // Системы управления, связи и безопасности. – 2015. – № 1. – С. 26–36.
5. Гончаров Р. Б., Зузов В. Н. Численное моделирование высокоскоростного удара по алюминиевой пластине в ANSYS и LS-DYNA : учебно-методич. пособие. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2022. – 28 с.
6. Зузов В. Н. Механика наземных транспортно-технологических средств : учеб. пособие. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. – 185 с.

В. И. Ерохин,
доктор физико-математических наук, профессор;
А. П. Кадочников,
кандидат технических наук, доцент;
Д. С. Кадочникова;
В. Я. Пророк,
доктор технических наук, профессор;
С. В. Сотников,
кандидат технических наук

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОРБИТЫ КОСМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА В ТЕРРИТОРИАЛЬНО-РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЕ НАБЛЮДЕНИЯ

В статье рассмотрен метод определения орбиты космического объекта в территориально-распределенной системе наблюдения. Суть метода заключается в определении «мгновенных» значений кеплеровых элементов орбиты космического объекта по наблюдениям его угловых топоцентрических координат наземной системой оптических и пассивных радиолокационных средств на «малой дуге» (временном интервале, существенно меньшем периода обращения космического объекта).

Ключевые слова: определение орбит, малый временной интервал, несинхронные угловые измерения, территориально-распределенная система наблюдения.

ВВЕДЕНИЕ

Определение орбиты космического объекта (КО) по угловым наблюдениям характеризуется двумя проблемами [1–7]: невозможностью получения аналитического решения и слабой чувствительностью наблюдаемых координат к значительным вариациям большой полуоси и эксцентриситета орбиты при определенных ракурсах наблюдения. Эти факты делают задачу нахождения параметров орбиты плохо обусловленной (некорректной) [8], в силу чего сравнительно небольшие погрешности определения угловых координат КО вызывают существенные погрешности определения параметров орбиты.

Для преодоления указанных недостатков предложен метод определения (итерационного уточнения) параметров орбиты по угловым топоцентрическим координатам (азимуту и углу места), регуляризованным нелинейным методом наименьших модулей, являющимся устойчивым к ошибкам измерения координат и позволяющим комплексовать несинхронные координатные измерения, полученные от информационных средств территориально-распределенной системы наблюдения.

СОДЕРЖАТЕЛЬНАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Космический объект наблюдается информационными средствами (ИС) – оптическими, пассивными радиолокационными, размещенными на Земле и значительно (сотни или тысячи километров) удаленными друг от друга. Требуется непрерывно, в реальном времени по значениям топоцентрических угловых координат КО, полученным от соответствующих ИС, на последовательности несовпадающих и несинхронных «малых» временных интервалов (малых дугах) определять «мгновенные» значения кеплеровых элементов орбиты КО. При этом принимаются следующие допущения.

Движение КО в пределах «малой дуги» считается невозмущенным, параметры вращения Земли считаются постоянными, вращение Земли – равномерным, прецессия и нутация не учитываются. Модель земного эллипсоида, основные постоянные системы геодезических

параметров Земли и формулы пересчета геодезических координат точек стояния информационного средства в прямоугольные координаты инерциальной геоцентрической системы координат (ИГСК) соответствуют документу «Параметры Земли 1990 года» (ПЗ-90.11). Шкала времени является относительной, отсчет времени ведется от некоторого момента времени t_0 .

ФОРМАЛЬНАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Модель движения КО и наблюдения его угловых координат представлена следующими соотношениями [9–11]:

$$M = \sqrt{\frac{\mu}{a^3}}(t - t_{\pi}); \quad (1)$$

$$E: E - e \sin E = M; \quad (2)$$

$$R = a(1 - e \cos E); \quad (3)$$

$$u = \omega + 2 \arctg \left(\sqrt{\frac{1+e}{1-e}} \cdot \operatorname{tg} \frac{E}{2} \right); \quad (4)$$

$$Q = \begin{bmatrix} \cos \Omega & -\sin \Omega \cos i \\ \sin \Omega & \cos \Omega \cos i \\ 0 & \sin i \end{bmatrix}, \quad X_{\text{ИГСК}} = \begin{bmatrix} x_{\text{ИГСК}} \\ y_{\text{ИГСК}} \\ z_{\text{ИГСК}} \end{bmatrix} = RQ \begin{bmatrix} \cos u \\ \sin u \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$$\theta(t) = t \frac{\pi}{43200} 1.002737909350795; \quad (6)$$

$$S(t) = \begin{bmatrix} \cos \theta(t) & \sin \theta(t) & 0 \\ -\sin \theta(t) & \cos \theta(t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad X_{\text{ГСК}} = \begin{bmatrix} x_{\text{ГСК}} \\ y_{\text{ГСК}} \\ z_{\text{ГСК}} \end{bmatrix} = S(t) X_{\text{ИГСК}}; \quad (7)$$

$$X_{\text{МТСК}} = \begin{bmatrix} x_{\text{МТСК}} \\ y_{\text{МТСК}} \\ z_{\text{МТСК}} \end{bmatrix} = G^{\text{ИС}} \cdot (X_{\text{ГСК}} - X_{\text{ГСК}}^{\text{ИС}}); \quad (8)$$

$$\alpha: \cos \alpha = \frac{x_{\text{МТСК}}}{\sqrt{x_{\text{МТСК}}^2 + y_{\text{МТСК}}^2}}, \quad \sin \alpha = \frac{y_{\text{МТСК}}}{\sqrt{x_{\text{МТСК}}^2 + y_{\text{МТСК}}^2}}; \quad (9)$$

$$\beta = \arctg \left(\frac{z_{\text{МТСК}}}{\sqrt{x_{\text{МТСК}}^2 + y_{\text{МТСК}}^2}} \right). \quad (10)$$

В формулах (1)–(10) использованы следующие обозначения: M – средняя аномалия; μ – геоцентрическая гравитационная постоянная; a – большая полуось; t – момент времени, которому соответствуют текущие координаты КО; t_{π} – время прохождения перигея; E – эксцентрисическая аномалия; R – геоцентрическое расстояние КО; e – эксцентриситет; u – аргумент широты; ω – аргумент перигея; $X_{\text{ИГСК}}$ – прямоугольные координаты КО в ИГСК; $\theta(t)$ – угол поворота гринвичской (геоцентрической) системы координат (ГСК) относительно ИГСК; $S(t)$ – матрица поворота ГСК; $X_{\text{МТСК}}$ – прямоугольные координаты КО в местной топоцентрической системе

координат (МТСК) информационного средства; $G^{\text{ИС}}$ – матрица перехода от ГСК к МТСК, связанной с информационным средством; $X_{\text{ГСК}}^{\text{ИС}} = [x_{\text{ГСК}}^{\text{ИС}} \ y_{\text{ГСК}}^{\text{ИС}} \ z_{\text{ГСК}}^{\text{ИС}}]^T$ – прямоугольные координаты точки стояния информационного средства в ГСК; α – азимут КО в МТСК информационного средства; β – угол места КО в МТСК информационного средства.

Расчетные соотношения для вычисления вектора $X_{\text{ГСК}}^{\text{ИС}}$ по геодезическим координатам точки стояния информационного средства и вычисления матрицы $G^{\text{ИС}}$ по вектору $X_{\text{ГСК}}^{\text{ИС}}$ приводить не будем – они не влияют на логику последующего изложения, и их можно найти в справочной литературе (например, [11]).

Постановка задачи.

Дано: массив исходных координатных замеров на «малой дуге» вида $\{\alpha_{j,k}, \beta_{j,k}, t_{j,k}\}$, где $j = 1, 2, \dots, J_k$ – номер отсчета координат и времени, $k = 1, 2, \dots, K$ – номер информационного средства, K – количество информационных средств, J_k – количество координатных замеров, выполненных информационным средством с номером k , геодезические координаты точек стояния информационного средства, момент времени t_0 , принятый за начало отсчета времени.

Найти: параметры кеплеровской модели (1)–(5) $\{\hat{a}, \hat{e}, \hat{i}, \hat{\Omega}, \hat{\omega}, \hat{t}_\pi\}$, которые наилучшим образом (в смысле минимума суммы модулей ошибок) аппроксимируют исходные координатные данные:

$$\Phi(a, e, i, \Omega, \omega, t_\pi) = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J_k} (|\tilde{\alpha}_{j,k} - \alpha_{j,k}| + |\tilde{\beta}_{j,k} - \beta_{j,k}|) \rightarrow \min, \quad (11)$$

где $\tilde{\alpha}_{j,k}, \tilde{\beta}_{j,k}$ – значения азимутов и углов места КО, вычисленные по формулам (1)–(10) при некоторых $a, e, i, \Omega, \omega, t_\pi$. Критерий в виде минимума суммы модулей ошибок аппроксимации наблюдаемых угловых координат кеплеровской моделью невозмущенного движения выбран в результате вычислительных экспериментов, показавших его меньшую чувствительность (робастность) к ошибкам наблюдений по сравнению с критерием в виде суммы квадратов ошибок, используемым в широко известном методе наименьших квадратов.

МЕТОД РЕШЕНИЯ

Совокупность формул (1)–(10) можно представить в виде функций:

$$(a, e, i, \Omega, \omega, t_\pi, t), \beta(a, e, i, \Omega, \omega, t_\pi, t).$$

Используя имеющийся в распоряжении массив координатных замеров $\{\alpha_{j,k}, \beta_{j,k}, t_{j,k}\}$ (на некоторой «малой дуге»), рассмотрим переопределенную систему (нелинейных) уравнений вида

$$\alpha(a, e, i, \Omega, \omega, t_\pi, t_{j,k}) \cong \alpha_{j,k}, \beta(a, e, i, \Omega, \omega, t_\pi, t_{j,k}) \cong \beta_{j,k}, \quad (12)$$

$$j = 1, 2, \dots, J_k, k = 1, 2, \dots, K.$$

Решение $\{\hat{a}, \hat{e}, \hat{i}, \hat{\Omega}, \hat{\omega}, \hat{t}_\pi\}$ системы (12) регуляризованным нелинейным методом наименьших модулей является одновременно решением задачи (11) и может быть получено методом нелинейных вариационно-взвешенных квадратичных приближений [12], регуляризованным с помощью усеченного сингулярного разложения [13–15].

Принципиальную схему метода для общего случая решения переопределенной системы нелинейных уравнений вида $F_\ell(x) \cong f_\ell$, где x – n -мерный вектор неизвестных параметров, f_ℓ – экспериментальные значения, $\ell = 1, 2, \dots, m, m \geq n$, можно описать формулой

$$x^{q+1} = x^q - \lambda(\tilde{J}^q)^{++}\tilde{r}^q, \quad q = 0, 1, \dots, Q, \quad (13)$$

где q – номер шага;
 λ – заданная пользователем длина шага, $0 < \lambda \leq 1$;
 Q – число шагов, после которых критерий (11) перестает уменьшаться;
 \tilde{J}^q – матрица функции аргумента x^q , $\tilde{J}^q = \tilde{J}(x^q)$;
 \tilde{r}^q – вектор функции аргумента x^q , $\tilde{r}^q = \tilde{r}(x^q)$.

Формулы для вычисления указанных объектов и операции $(\cdot)^{++}$, полученные в соответствии с [12–16], представлены ниже. Для уменьшения громоздкости индекс q при аргументе x в формулах опущен:

$$J(x) = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_1(x)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial F_1(x)}{\partial x_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial F_m(x)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial F_m(x)}{\partial x_n} \end{pmatrix}, \quad r(x) = (r_\ell(x)) = \begin{pmatrix} F_1(x) - f_1 \\ \vdots \\ F_m(x) - f_m \end{pmatrix}, \quad (14)$$

$$w(x) = \left(w_\ell(x) = \begin{cases} r_\ell^{-\frac{1}{2}}(x) & \text{если } r_\ell(x) \neq 0 \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases} \right), \quad (15)$$

$$\tilde{J}(x) = \text{diag}(w(x)) \cdot J(x), \quad \tilde{r}(x) = \text{diag}(w(x)) \cdot r(x), \quad (16)$$

$$(\tilde{J}(x))^{++} = V\Sigma^{++}U^T, \quad (17)$$

где U , Σ , V – элементы сингулярного разложения матрицы $\tilde{J}(x)$: матрицы U и V составлены из ортонормированных столбцов и имеют размеры $m \times p$ и $p \times n$ соответственно, а $\Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \dots, \sigma_p)$ – ненулевые сингулярные числа $\tilde{J}(x)$, $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_{p-1} \geq \sigma_p > 0$. При этом $p \leq n$ – ранг матрицы $\tilde{J}(x)$. Предполагаем, что $p \geq 2$ и с учетом указанного предположения

$$\Sigma^{++} = \text{diag}(\sigma_1^{-1}, \dots, \sigma_{p-1}^{-1}, 0). \quad (18)$$

Представленный формулами (13)–(18) метод (регуляризованный нелинейный метод наименьших модулей (РНМНМ)) потенциально является более устойчивым к ошибкам измерений, чем классический нелинейный метод наименьших квадратов (НМНК), что обусловлено хорошо известной робастностью МНМ и использованием регуляризации. Указанное предположение полностью подтвердилось в вычислительных экспериментах. «Обратную совместимость» РНМНМ с НМНК можно проследить следующим образом:

1) при замене $(\tilde{J}^q)^{++}$ в формуле (13) и $(\tilde{J}(x))^{++}$ в формуле (17) на $(\tilde{J}^q)^+ = (\tilde{J}(x^q))^+$, где

$$(\tilde{J}(x))^+ = V\Sigma^+U^T, \quad \Sigma^+ = \text{diag}(\sigma_1^{-1}, \dots, \sigma_{p-1}^{-1}, \sigma_p^{-1}), \quad (19)$$

сингулярное разложение матрицы $\tilde{J}(x)$ перестает быть усеченным и РНМНМ превращается в (не регуляризованный) нелинейный метод наименьших модулей (НМНМ);

2) при замене $w_\ell(x)$ в формуле (15) на $w_\ell(x) \equiv 1$ НМНМ превращается в (не регуляризованный) НМНК. Заметим, что матрица $(\tilde{J}(x))^+$, заданная формулой (19), это классическая псевдообратная матрица к матрице $\tilde{J}(x)$.

Связь абстрактного РНМНМ (формулы (13)–(18)) с конкретными задачами (11), (12) следующая: $x = (a, e, i, \Omega, \omega, t_\pi)^T$, f_ℓ – это $\alpha_{j,k}$ и $\beta_{j,k}$, $F_\ell(x)$ – это $\alpha(a, e, i, \Omega, \omega, t_\pi, t_{j,k})$ и $\beta(a, e, i, \Omega, \omega, t_\pi, t_{j,k})$.

Все упомянутые выше методы нуждаются в задании начальных приближений $a^0, e^0, t_\pi^0, i^0, \Omega^0, \omega^0$, т. е. в выполнении этапа, называемого в литературе определением «начальной» или «предварительной» орбиты, предназначенного для определения «грубых» оценок $\check{a}, \check{e}, \check{t}_\pi, \check{i}, \check{\Omega}, \check{\omega}$, принимаемых в качестве требуемых начальных приближений. Однако дополнительные вычислительные эксперименты показали, что получаемые оценки $\check{a}, \check{e}, \check{t}_\pi, \check{i}, \check{\Omega}, \check{\omega}$ являются надежными начальными приближениями РНММ (не говоря уже о НММ и НМНК) только при весьма малых величинах абсолютных погрешностей измерений (порядка 1–2 угловых минут). Таким образом, этап определения предварительной орбиты в настоящей статье не рассматривается, поскольку требует дополнительного исследования.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Моделируется движение КО по невозмущенной кеплеровской орбите и его наблюдение двумя информационными средствами (ИС № 1, ИС № 2). Параметры орбиты: $a = 6965$ км (высота орбиты $H = 574$ км), $e = 0.334$, $\tau = -1619.715$ с, $i = 74.595^\circ$, $\Omega = 28.13^\circ$, $\omega = 285^\circ$. Точки стояния: ИС № 1 – $\phi_1 = 51.27^\circ$ с.ш., $\lambda_1 = 58.96^\circ$ в.д. (Оренбургская область), ИС № 2 – $\phi_2 = 52.86^\circ$ с.ш., $\lambda_2 = 103.23^\circ$ в.д. (Иркутская область). Количество наблюдений $N_1 = N_2 = 20$. Время наблюдений (от момента начала наблюдений, принятого за 0) $t_{j,1} = 4,8, \dots, 80$ с, $t_{j,2} = 52.207, 56.207, \dots, 128.207$ с. В качестве «измерений» ИС № 1, ИС № 2 принимаются массивы вида $\{\alpha_{j,1}, \beta_{j,1}, t_{j,1}\}, \{\alpha_{j,2}, \beta_{j,2}, t_{j,2}\}$. К угловым координатам, рассчитанным по формулам (1)–(10), добавлен «шум» в виде равномерно распределенных на отрезке $[-\varepsilon, \varepsilon]$ псевдослучайных чисел. Параметр ε принимает значения $\varepsilon = 3, 6, 9, 12'$. В качестве начальных приближений (параметров предварительной орбиты) были приняты величины $a^0 = a(1 \pm \Delta a)$, $e^0 = e(1 \pm \Delta e)$, $i^0 = i(1 \pm \Delta i)$, $\Omega^0 = \Omega(1 \pm \Delta \Omega)$, $\omega^0 = \omega(1 \pm \Delta \omega)$, $t_\pi^0 = t_\pi(1 \pm \Delta t_\pi)$, где относительные погрешности $\Delta a, \Delta e, \Delta t_\pi, \Delta i, \Delta \Omega, \Delta \omega \in [0, 1]$ определялись экспериментально как максимальные значения, при которых сходимость применяемых для уточнения параметров орбиты методов НМНК, НММ и РНММ еще имела место. Частные производные от функций $\alpha(a, e, i, \Omega, \omega, t_\pi, t_{j,k})$, $\beta(a, e, i, \Omega, \omega, t_\pi, t_{j,k})$ по параметрам $a, e, i, \Omega, \omega, t_\pi$ вычислялись по аналитическим формулам. Параметры λ и Q подбирались экспериментально из условия минимума целевой функции (11).

Результаты уточнения параметров орбиты с помощью НМНК, НММ и РНММ, представлены в табл. 1 и на рис. 1–4 только для РНММ. Они свидетельствуют о работоспособности РНММ, большей точности по сравнению с НММ и НМНК, но ожидаемо демонстрируют рост уровня погрешностей ответа (найденных оценок $\hat{a}, \hat{e}, \hat{i}, \hat{\Omega}, \hat{\omega}, \hat{t}_\pi$) с ростом уровня погрешностей исходных данных.

Таблица 1

Результаты вычислительного эксперимента

$\varepsilon, '$	Длина шага λ , число шагов Q , средняя ошибка угловых координат Φ/N (Φ – целевая функция (11), $N = 2(N_1 + N_2)$), относительные погрешности начальных приближений и уточнения кеплеровых элементов орбиты по НМНК, НММ и РНММ, %								
	λ	Q	Φ/N	Δa	Δe	Δi	$\Delta \Omega$	$\Delta \omega$	Δt_π
3	–	–	10.493 °	2.42	7.87	3.78	18.15	1.15	2.12
	0.128	130	2.834 '	0.20	1.19	0.04	0.18	0.20	0.88
	0.179	210	2.800 '	0.03	0.25	0.08	0.37	0.01	0.08
	0.109	250	2.795 '	0.04	0.29	0.07	0.34	0.01	0.10

Окончание табл. 1

$\varepsilon, ^\circ$	Длина шага λ , число шагов Q , средняя ошибка угловых координат Φ/N (Φ – целевая функция (11), $N = 2(N_1 + N_2)$), относительные погрешности начальных приближений и уточнения кеплеровых элементов орбиты по НМНК, НМНМ и РНМНМ, %								
	λ	Q	Φ/N	Δa	Δe	Δi	$\Delta \Omega$	$\Delta \omega$	Δt_π
6	–	–	22.250 °	4.88	15.81	7.59	36.44	2.32	4.27
	0.080	150	5.667 ′	0.04	2.4	0.08	0.35	0.39	1.75
	0.179	200	5.599 ′	0.02	0.34	0.15	0.73	0.02	0.14
	0.109	250	5.567 ′	0.06	1.91	0.03	0.11	0.14	1.11
9	–	–	41.817 °	14.5	34.37	6.94	30.25	8.03	12.66
	0.020	1200	7.745 ′	0.02	1.40	0.09	0.43	0.05	0.72
	0.011	1900	8.325 ′	0.46	5.70	0.36	1.85	0.06	2.59
	0.110	1200	7.696 ′	0.20	3.21	0.28	1.34	0.01	1.50
12	–	–	23.099 °	2.68	8.66	4.01	5.96	1.39	1.78
	0.128	100	11.663 ′	0.24	4.32	0.03	0.01	0.09	2.19
	0.039	1300	11.535 ′	0.56	0.02	0.35	1.53	0.34	0.64
	0.135	800	11.475 ′	0.31	0.65	0.14	0.63	0.16	0.01

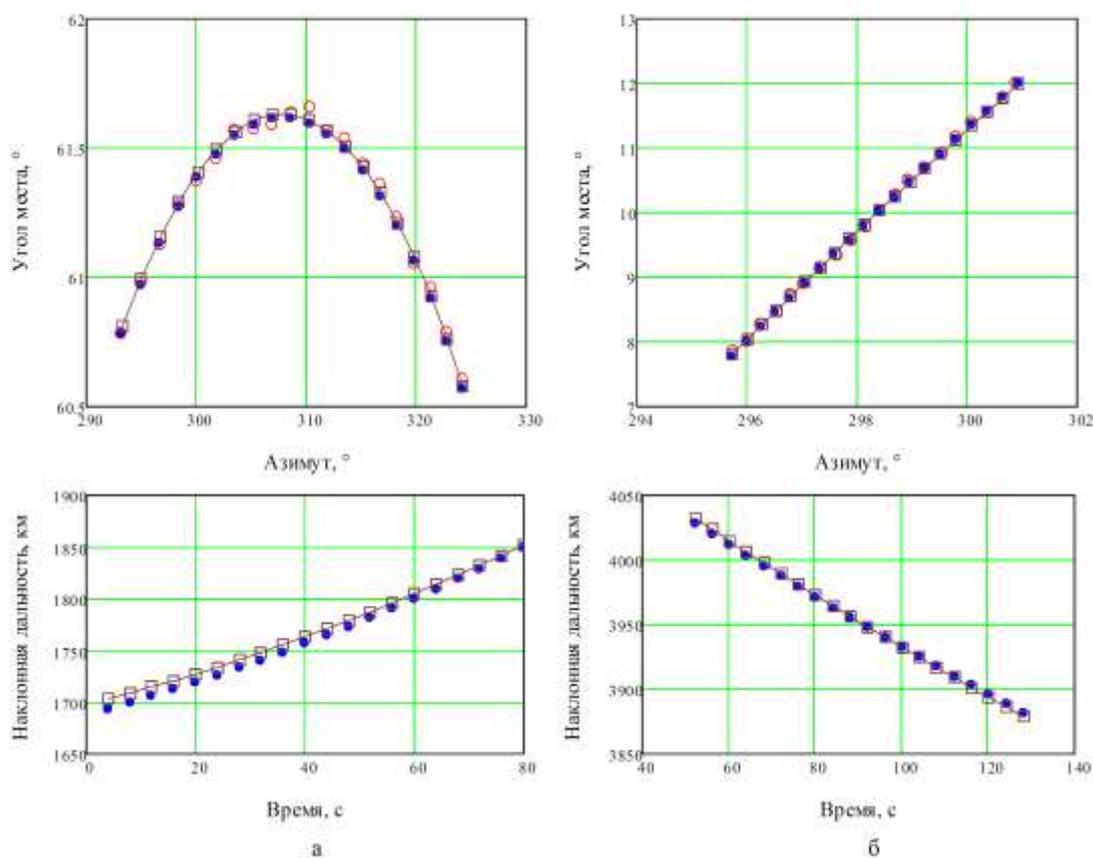


Рис. 1. Результат определения орбиты с помощью РНМНМ при $\varepsilon = 3'$:
 а – траектории в зоне обзора информационного средства № 1; б – траектории в зоне обзора информационного средства № 2; $\circ \circ$ – модельная «наблюдаемая» траектория; $\bullet \bullet$ – траектория, восстановленная по модельным наблюдениям; $\square \square$ – модельная «истинная» траектория

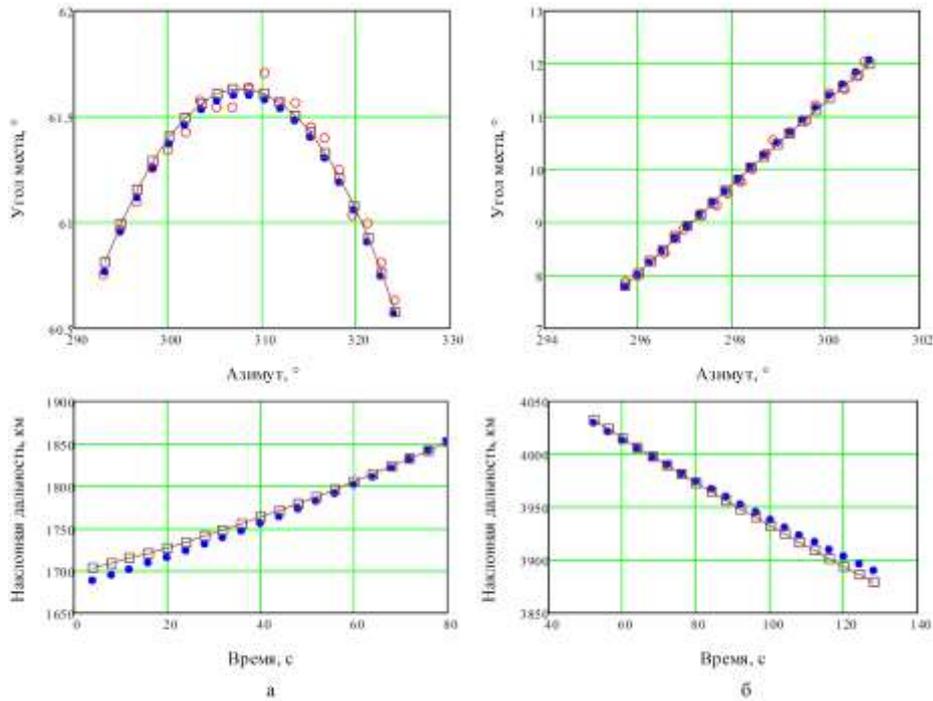


Рис. 2. Результат определения орбиты с помощью РНММ при $\varepsilon = 6'$:
 а – траектории в зоне обзора информационного средства № 1; б – траектории в зоне обзора информационного средства № 2; $\circ \circ$ – модельная «наблюдаемая» траектория;
 $\bullet \bullet \bullet$ – траектория, восстановленная по модельным наблюдениям; $\square \square$ – модельная «истинная» траектория

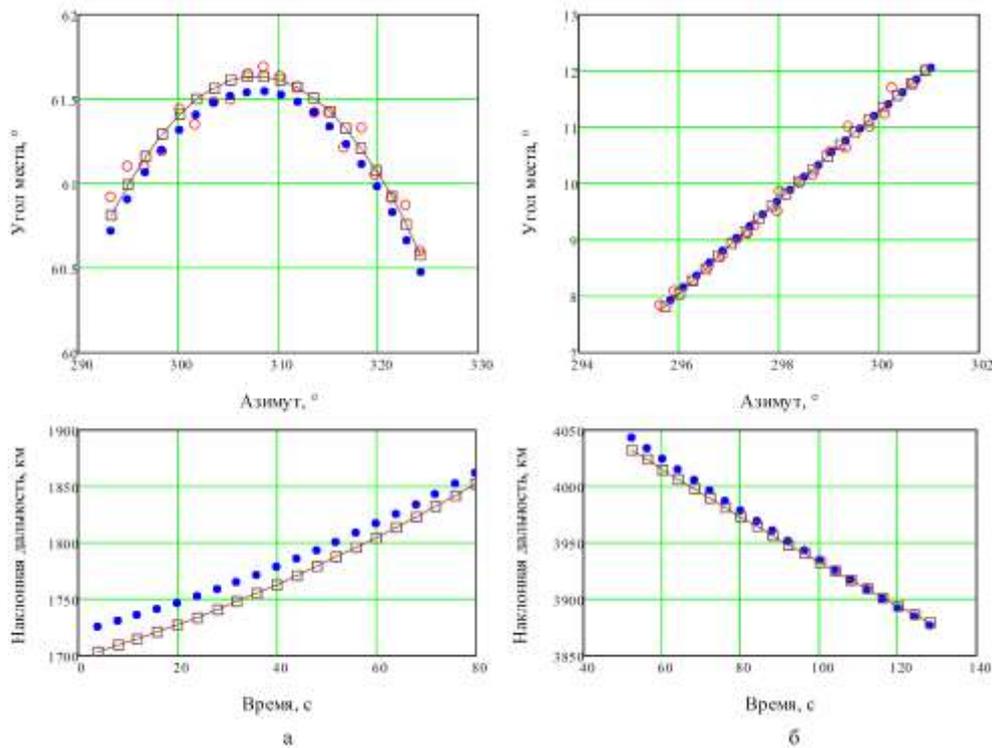


Рис. 3. Результат определения орбиты с помощью РНММ при $\varepsilon = 9'$:
 а – траектории в зоне обзора информационного средства № 1; б – траектории в зоне обзора информационного средства № 2; $\circ \circ$ – модельная «наблюдаемая» траектория;
 $\bullet \bullet \bullet$ – траектория, восстановленная по модельным наблюдениям; $\square \square$ – модельная «истинная» траектория

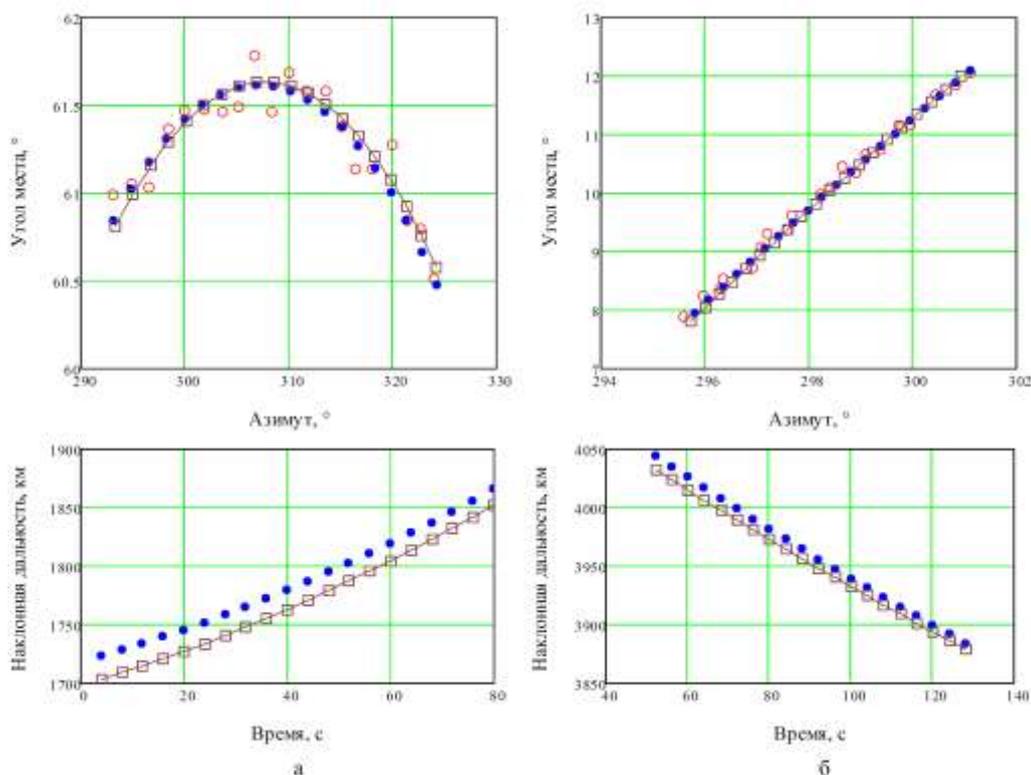


Рис. 4. Результат определения орбиты с помощью РНМНМ при $\varepsilon = 12'$:
 а – траектории в зоне обзора информационного средства № 1; б – траектории в зоне обзора информационного средства № 2; $\circ \circ$ – модельная «наблюдаемая» траектория;
 $\bullet \bullet \bullet$ – траектория, восстановленная по модельным наблюдениям; $\square \square$ – модельная «истинная» траектория

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показали вычислительные эксперименты, представленный в работе регуляризованный нелинейный метод наименьших модулей определения орбиты КО по наблюдениям его угловых топоцентрических координат является работоспособным. Он позволяет комплексировать координатную информацию от нескольких пространственно-распределенных средств наблюдения без требования синхронности координатных измерений и демонстрирует меньшую чувствительность погрешностей результата (параметров орбиты КО) к уровню ошибок исходных данных (измеренных координат). Возможной областью применения предлагаемого метода может служить уточнение элементов орбит космических объектов природного и техногенного характера с целью актуализации сведений каталога космических объектов.

Список используемых источников

1. Milani A., Gronchi G. Theory of orbit determination. – New York : Cambridge University Press, 2010. – 382 p.
2. Быков О. П., Холиевников К. В. Прямые методы определения орбит небесных тел. – СПб. : СПбГУ, 2013. – 151 с.
3. Curtis H. D. Orbital Mechanics for Engineering Students. Revised Reprint. – Butterworth-Heinemann, 2020. – 763 p.
4. Vallado D. A. Fundamentals of Astrodynamics and Applications // 5th Edition. Microcosm Press. – 2022. – 1136 p.

5. Хуторовский З. Н., Бойков В. Ф., Пылаев Л. Н. Контроль космических объектов на низких высотах // Околоземная астрономия (космический мусор) : сб. науч. тр. – М. : Институт астрономии РАН, 1998. – С. 34–101.
6. Космический мусор / под науч. ред. докт. техн. наук, проф. Г. Г. Райкунова : в 2 кн. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2014. – Кн. 1 : Методы наблюдения и модели космического мусора. – 248 с.
7. Ачасов О. Б., Астраханцев М. В., Олейников И. И. Обоснование требований к системам мониторинга околоземного космического пространства при стратегическом сдерживании // Вооружение и экономика. – 2016. – Вып. 3. – С. 6–14.
8. Алешкин А. П. Основы теории адаптивного смещенного оценивания с нелинейными ограничениями и ее применение к решению некорректных навигационных задач. – СПб. : ВИКУ им. А. Ф. Можайского, 2001. – 153 с.
9. Дубошин Г. Н. Небесная механика. Основные задачи и методы. – М. : Наука, 1975. – 800 с.
10. Эльясберг П. Е. Введение в теорию полета искусственных спутников Земли. – М. : Наука, 1965. – 540 с.
11. Машиностроение : энцикл. : в 40 т. – М. : Машиностроение, 2012. – Т. IV-22 : Ракетно-космическая техника : в 2 кн. / А. П. Аджян [и др.]; отв. ред. В. П. Легостаев; ред. Э. Л. Аким [и др.]. – Кн. 1. – 924 с.
12. Мудров В. И., Кушко В. Л. Методы обработки измерений. Квазиправдоподобные оценки. – М. : Радио и связь, 1983. – 304 с.
13. Hansen P. C. The truncated SVD as a method for regularization // BIT Numerical Mathematics. – 1987. – Vol. 27. – P. 534–553.
14. Boikov V., Khutorovsky Z., Alfriend K. Singular Value Decomposition and Least Squares Orbit Determination // In 7th US/Russian Space Surveillance Workshop Proceeding. NASA. – 2007. – P. 143–155.
15. Лысенко Л. Н., Бетанов В. В., Звягин В. Ф. Теоретические основы баллистико-навигационного обеспечения космических полетов. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 518 с.
16. Дэннис Дж.-мл., Шнабель Р. Численные методы безусловной оптимизации и решения нелинейных уравнений. – М. : Мир, 1988. – 440 с.

Д. В. Левин,
кандидат технических наук;
А. В. Паршуткин,
доктор технических наук, профессор

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОСТРОЕНИЯ ИНВЕРСНО-СИНТЕЗИРУЕМОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ЦЕЛИ ПРИ СОВМЕСТНОЙ ОБРАБОТКЕ РАЗНЕСЕННЫХ ПО ЧАСТОТЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

Рассмотрен принцип формирования комплексного радиолокационного изображения при наблюдении цели наземной радиолокационной станцией обзора пространства, функционирующей в режиме инверсного синтеза апертуры антенны. Разработана модель и представлен порядок обработки двух узкополосных радиолокационных сигналов, разнесенных по частоте, при построении инверсно-синтезируемого комплексного радиолокационного изображения цели. Приведены результаты моделирования оценивания разрешающей способности радиолокационной системы по дальности и угловому положению точечного объекта по интенсивности инверсно-синтезируемого радиолокационного изображения при совместной обработке двух разнесенных по частоте радиолокационных сигналов.

Ключевые слова: инверсное синтезирование апертуры антенны, межпериодное накопление сигналов, радиолокационная станция, радиолокационное изображение, точечный объект.

ВВЕДЕНИЕ

Наземные радиолокационные станции (РЛС) обзора пространства являются одним из основных источников информации о состоянии воздушно-космического пространства, в которых обнаружение целей на расстояниях до нескольких тысяч километров основано на применении сложных зондирующих сигналов (ЗС) большой длительности. РЛС обзора пространства предназначены для формирования достоверной радиолокационной информации о целях независимо от погодных условий, времени года и суток [1, 2]. Функциональные возможности РЛС обзора пространства определяются разрешающей способностью по дальности, угловым координатам и радиальной скорости, а также отношением мощности принятого сигнала к суммарной мощности внутренних шумов и внешних шумовых помех после обработки принятого сигнала в приемном радиоустройстве [1, 2].

В современных РЛС обзора пространства для решения задач обнаружения целей и сопровождения их траекторий с требуемым качеством применяются сигналы с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ), фазоманипулированные (ФМн) сигналы и когерентные пачки импульсов [1–4]. Кроме того, в радиолокационных системах реализуются различные подходы для повышения энергетики радиолинии за счет использования высокопотенциальных передающих и узконаправленных приемных антенн, использования широкополосных сигналов большой длительности, а также возможностей накопления сигналов на длительных интервалах радиолокационного наблюдения.

Реализация накопления принятых радиолокационных сигналов возможна как при накоплении одиночных ЗС или пачек импульсов, так и при межпериодном накоплении. При наблюдении за движущимися целями выполняется коррекция доплеровского набега фазы сигнала за период повторения, совмещение во времени одиночных сигналов и синфазное сложение нескольких сигналов на всем интервале наблюдения, тем самым обеспечивая когерентное накопление сигналов. При межпериодном накоплении сигналов используются последовательности выборочных значений огибающей, полученных при одной и той же задержке в нескольких последовательно следующих периодах зондирования [2, 5].

Наибольшие интервалы накопления могут быть обеспечены при межпериодной обработке радиолокационных сигналов, принятых от движущихся целей. В том числе при накоплении сигналов принятых РЛС обзора пространства в режиме инверсного синтезирования апертуры (ИСА), когда данные радиолокационных измерений, полученные в каждом отдельном периоде зондирования, сохраняются совместно с данными об угловом положении цели [3–5]. При этом появляется возможность формирования комплексных радиолокационных изображений (РЛИ) целей на дальностях до нескольких тысяч километров. В режиме ИСА повышается разрешающая способность только по поперечной координате цели на формируемом РЛИ, т. е. повышается разрешающая способность по угловому положению цели относительно РЛС обзора пространства [3, 6]. Применение узкополосных ЗС не позволяет достигать высоких показателей разрешения по продольной координате цели на РЛИ, поскольку точность измерения дальности определяется шириной спектра радиолокационного сигнала. Для повышения разрешающей способности по продольной координате цели на ее РЛИ целесообразно применять подход, основанный на совместной обработке двух узкополосных ЗС, разнесенных по частоте [7–9]. Такой подход может позволить без внесения серьезных доработок в генерирующую аппаратуру существующих образцов РЛС обзора пространства использовать при обработке аддитивный радиолокационный сигнал, сформированный путем суммирования синхронизированных по времени двух разнесенных по частоте узкополосных ЗС, излучаемых разными и независимо функционирующими передающими антеннами. Тогда при комплексной обработке двух разнесенных по частоте радиолокационных сигналов, принятых от одной и той же цели, появляется возможность увеличения разрешающей способности по продольной координате на ее РЛИ, а следовательно, может быть увеличена разрешающая способность РЛС обзора пространства по дальности [7–9]. Поэтому исследования в области повышения разрешающей способности наземных РЛС обзора пространства по дальности и угловому положению целей при построении их инверсно-синтезируемых РЛИ в результате совместной обработки двух разнесенных по частоте радиолокационных сигналов, являются актуальными.

Цель исследования состоит в выявлении зависимостей изменения разрешающей способности РЛС обзора пространств по дальности и угловому положению целей при совместной обработке двух узкополосных ЗС, разнесенных по частоте, используемых для формирования комплексного инверсно-синтезируемого РЛИ движущейся цели.

МОДЕЛЬ СОВМЕСТНОЙ ОБРАБОТКИ ДВУХ УЗКОПОЛОСНЫХ ЗОНДИРУЮЩИХ СИГНАЛОВ, РАЗНЕСЕННЫХ ПО ЧАСТОТЕ, ПРИ ФОРМИРОВАНИИ КОМПЛЕКСНОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ЦЕЛИ

Рассмотрим ситуацию, когда наземная РЛС обзора пространства в режиме ИСА наблюдает за целью, движущейся по траектории в пределах азимутальной зоны обзора $\psi_{\text{обз}}$. Пусть в РЛС обзора пространства имеется две разнодиапазонные приемо-передающие антенны, которые на частотах f_1 и f_2 в направлении на цель одновременно излучают по одному узкополосному ЗС. Пусть при этом отраженные сигналы принимаются и когерентно обрабатываются в соответствующих частотных каналах, усиливаются и запоминаются в специальном устройстве с учетом их амплитуды и фазы.

Принцип ИСА состоит в том, что она формируется последовательно во времени при приеме реальной апертурой отраженных электромагнитных волн от цели, движущейся или вращающейся относительно точки стояния РЛС. Синтезирование апертуры происходит в процессе последовательного во времени приема электромагнитных волн реальной апертурой РЛС при изменении положения цели относительно источника электромагнитной волны [2, 3]. В результате величина углового сектора наблюдения ИСА РЛС обзора пространства зна-

чительно превышает размеры физической антенны, что позволяет реализовать высокое разрешение по угловой координате при измерении положения перемещающейся цели [3].

В обобщенном виде математическая модель ЗС на частотах f_1 и f_2 может быть представлена в следующем комплексном виде [10]:

$$\dot{s}_i(t) = \dot{A}_i(t) \cdot \exp[j\omega_i t + \varphi_{0i}], i = 1, 2, \quad (1)$$

где $\dot{A}_i(t)$ – закон изменения комплексной амплитуды электромагнитного колебания на частоте f_i ;

ω_i – круговая частота электромагнитного колебания, $\omega_i = 2\pi f_i$;

j – мнимая единица;

t – параметр времени, причем $t \in (0, \tau_{\text{имп}})$, где $\tau_{\text{имп}} = \max(\tau_i)$ – длительность узкополосного ЗС;

φ_{0i} – начальная фаза электромагнитного колебания.

При облучении радиоимпульсами целей, находящихся в зоне обзора РЛС, происходит рассеяние электромагнитной энергии и отражение ее в сторону РЛС. Сигнал, отраженный от цели в точку приема, приходит с задержкой τ_3 , пропорциональной дальности до цели R : $\tau_3 = 2R/c$, где c – скорость распространения электромагнитной волны в среде [1, 3]. При движении цели относительно точки стояния РЛС обзора пространства возникает эффект Доплера, приводящий к смещению центральной частоты приема отраженного сигнала [3, 11]. Величина доплеровской поправки, учитывающей приближение или удаление цели относительно РЛС, определяется по следующей формуле [2, 8]:

$$F_{\text{доп}i} = -2V_r f_i / c = -2V_r \lambda_i, i = 1, 2, \quad (2)$$

где V_r – радиальная скорость движения цели (проекция вектора скорости цели на направление наблюдения) со знаком плюс, если цель приближается к РЛС и со знаком минус, если удаляется: $V_r = \pm \frac{dR}{dt}$;

λ_i – длина волны электромагнитного колебания.

Величина доплеровского смещения частоты $F_{\text{доп}}$ для наземных РЛС значительно меньше частоты повторения ЗС. Тогда математическую модель принятого радиолокационного сигнала $\dot{s}_{\text{прм}}(t)$ в каждом частотном канале можно представить следующим образом [6, 12]:

$$\dot{s}_{\text{прм}i}(t) = \dot{A}_i(t) \cdot \exp[j(\omega_i + \omega_{\text{доп}i})t + \varphi_{0i}] \cdot \exp[j\varphi_{\text{отр}i}(t)], \quad (3)$$

где $\omega_{\text{доп}i}$ – круговая частота доплеровского смещения частоты приема радиолокационного сигнала, $\omega_{\text{доп}i} = 2\pi F_{\text{доп}i}$;

$\varphi_{\text{отр}i}(t)$ – закон изменения фазы принятого радиолокационного сигнала, учитывающего отражательные способности цели и особенности прохождения сигнала через ионосферу и другие неоднородные среды [1, 4].

Для описания порядка построения комплексного РЛИ при совместной обработке двух узкополосных ЗС, разнесенных по частоте, будем считать, что все указанные факторы приводят к наличию пары случайных фазовых сдвигов $\delta\varphi_i$, которые можно полагать на интервале наблюдения постоянными величинами.

Для организации совместной обработки разнесенных по частоте принятых узкополосных сигналов $\dot{s}_{\text{прм}1(2)}(t)$ необходимо провести их синхронизацию, заключающуюся в том, что записанные в запоминающем устройстве реализации сигналов проходят процедуру дискретизации с единой частотой $f_{\text{дскр}}$, удовлетворяющей теореме Котельникова [10], т. е. $f_{\text{дскр}} \gg [2 \cdot (f_1 + \Delta f/2)]^{-1}$. Тогда аддитивный радиолокационный сигнал $\dot{s}_\Sigma(t)$ можно представить в следующем виде:

$$\dot{s}_{\Sigma}(t) = \dot{s}_{\text{прм1}}(t) + \dot{s}_{\text{прм2}}(t). \quad (4)$$

Для реализации корреляционной обработки радиолокационного сигнала $\dot{s}_{\Sigma}(t)$ опорный сигнал $\dot{s}_{\text{оп}}(t)$ задается аналогично (4) путем сложения синхронизированных по времени отсчетов узкополосных ЗС, задаваемых выражением (1). Тогда сигнал на выходе коррелятора $\dot{B}_{\Sigma}(\tau)$ будет иметь вид [2, 3, 12]

$$\dot{B}_{\Sigma}(\tau) = \int_{-\tau_{\text{имп}}}^{\tau_{\text{имп}}} \dot{s}_{\text{оп}}(t) \cdot \dot{s}_{\Sigma}(t - \tau) dt. \quad (5)$$

Изменение амплитуды принятых в разных частотных каналах двух узкополосных ЗС $\dot{s}_{\text{прм1(2)}}(t)$ влияет на величину максимума корреляционной функции (5), но не на его форму и положение [8]. После корреляционной обработки форма сигнала на выходе коррелятора $\dot{B}_{\Sigma}(\tau)$ будет определяться отношением $\delta f = \Delta f / \Delta F$, где ΔF – ширина частотного разнеса центральных частот исходных сигналов, а огибающая нормированной комплексной функции корреляции радиолокационного сигнала $B_{\Sigma}(\tau)$ будет иметь различное количество боковых лепестков [8] для различных Δf (рис. 1).

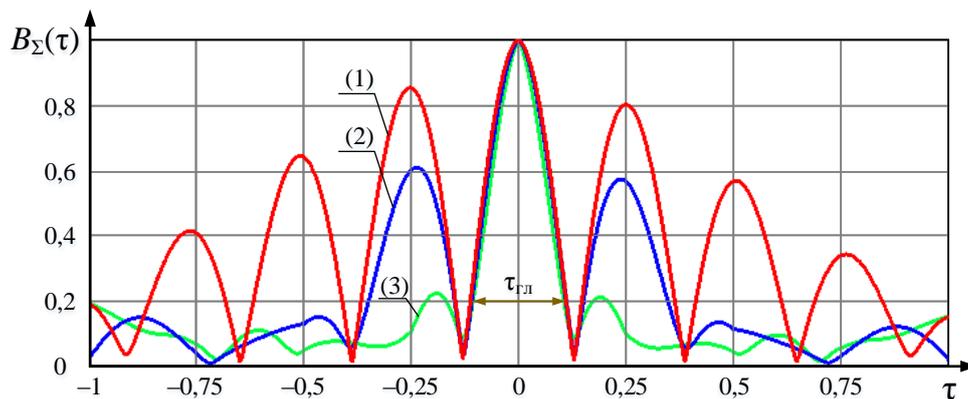


Рис. 1. Временная корреляционная функция радиолокационного сигнала $\dot{s}_{\Sigma}(t)$:
 $1 - \delta f = 0,2$; $2 - \delta f = 0,5$; $3 - \delta f = 1$

Из рис. 1 видно, что при стремлении δf к единице уровень боковых лепестков временной корреляционной функции $B_{\Sigma}(\tau)$ уменьшается, а ширина главного лепестка $\tau_{\text{гл}}$ остается неизменной. Здесь $\tau_{\text{гл}}$ – длительность сигнала на выходе коррелятора $\dot{B}_{\Sigma}(\tau)$ по уровню 0,2 главного лепестка функции корреляции $B_{\Sigma}(\tau)$.

При реализации ИСА данные измерений запоминаются в соответствии с последовательностью отсчетов дальности и азимутальных отсчетов и для описания порядка совместной обработки двух разнесенных по частоте узкополосных ЗС $\dot{s}_{\text{прм1(2)}}(t)$, принятых с нескольких азимутальных направлений, целесообразно представлять сигналы в векторной форме [13, 14].

Схема наблюдения за целью, движущейся со скоростью $\vec{v}_{\text{ц}}$ по азимутальным отсчетам траектории полета l_k , $k \in 1, \dots, K$ в зоне обзора РЛС пространства $\psi_{\text{обз}}$, функционирующей в режиме ИСА, и сигнал, принятый в течение интервала наблюдения $T_{\text{набл}}$, задаваемый двумерной матрицей, приведены на рис. 2. Для $t_{xk} \in (0, \dots, T_{\text{набл}})$ момента наблюдения цели в зоне обзора РЛС формируется вектор-столбец из N отсчетов принятого дискретного сигнала

$\dot{s}_\Sigma(n \cdot T)$, где $n \in (0, \dots, N)$, причем $N \cdot T = \tau_{\text{имп}}$. Тогда для каждого t_{x_k} момента наблюдения или k -го углового положения цели в зоне обзора пространства $\Psi_{\text{обз}}$ формируется свой k -й вектор-столбец принятого дискретного сигнала $\dot{s}_\Sigma(n \cdot T)$, а их объединение позволяет сформировать двумерную матрицу принятого сигнала $\dot{\mathbf{S}}_{\text{прм}}$ с количеством строк N и столбцов K [3, 4].

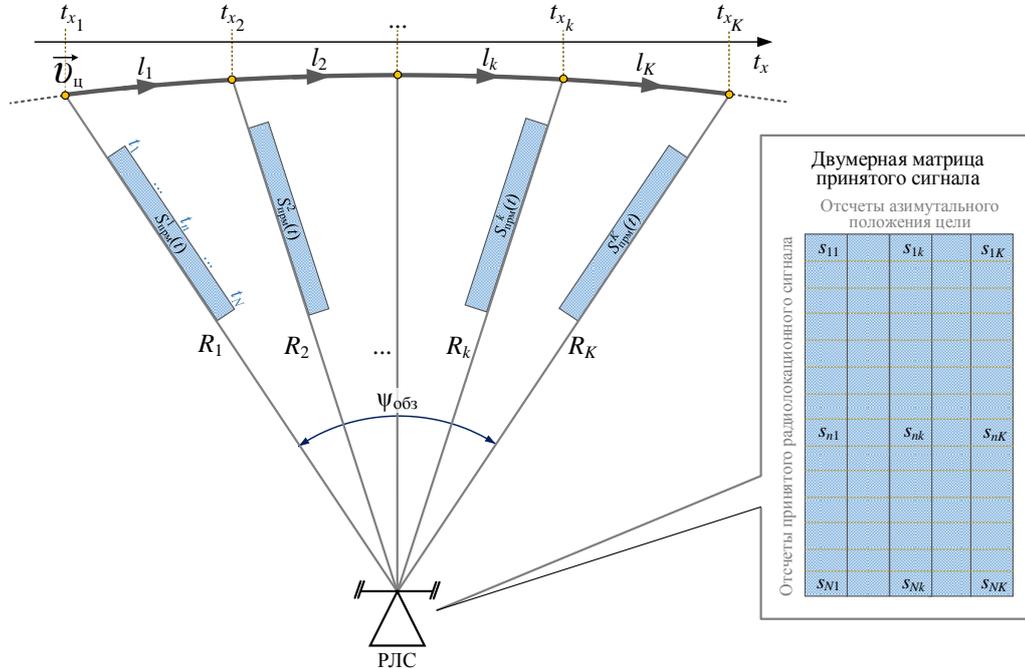


Рис. 2. Радиолокационное наблюдение цели в режиме инверсного синтезирования апертуры антенны

В матричном виде отсчеты опорного радиолокационного сигнала $\dot{s}_{\text{он}}(n \cdot T)$, где $n \in (0, \dots, N)$ можно представить в виде вектора-строки

$$\dot{\mathbf{S}}_{\text{он}[1 \times N]} = [\dot{s}_1 \quad \dots \quad \dot{s}_n \quad \dots \quad \dot{s}_N]^T, \tag{6}$$

где \dot{s}_n – реализации опорного радиолокационного сигнала $\dot{s}_{\text{он}}(n \cdot T)$ при заданном шаге дискретизации T .

Принятый на интервале наблюдения $T_{\text{набл}}$ радиолокационный сигнал $\dot{s}_\Sigma(t)$ для всех K азимутальных направлений в матричном виде

$$\dot{\mathbf{S}}_{\text{прм}[N \times K]} = \left[\bigcup_k (\dot{\mathbf{S}}_{\text{он}} \cdot \exp[-2\pi f_{\text{доп}_k} t_n]) \right], \tag{7}$$

где $f_{\text{доп}_k}$ – величина доплеровского смещения частоты, рассчитываемого по формуле (2), при k -м азимутальном направлении (в общем случае количество отсчетов азимутальных направлений задается равным 2^K [15–17]);

$\bigcup_k(\bullet)$ – объединение k вектор-столбцов для формирования матрицы;

$[N \times K]$ – размерность матрицы, содержащей N строк и K столбцов.

Совокупность сигналов после корреляционной обработки принятых с k -го азимутального направления в матричном виде

$$\dot{\mathbf{S}}_{\text{д}[I \times K]} = \left[\bigcup_k (\dot{\mathbf{S}}_{\text{д}}^{(k)}) \right], \tag{8}$$

где $\dot{\mathbf{S}}_{д[1 \times I]}^{(k)}$ – вектор длиной $I=2N$ является дискретным представлением функции корреляции радиолокационного сигнала $\dot{B}_\Sigma(\tau)$ для k -го азимутального направления, $\dot{\mathbf{S}}_{д[1 \times I]}^{(k)} = \text{correl}[\dot{\mathbf{S}}_{прм}^{(k)}, \dot{\mathbf{S}}_{оп}]$ (в общем случае количество строк матрицы $\dot{\mathbf{S}}_{д[I \times K]}$ задается равным 2^I для возможности применения быстрого прямого преобразования Фурье [15–17]).

При движении цели относительно РЛС обзора пространства, функционирующей в режиме ИСА, возникает эффект миграции дальности, который необходимо компенсировать при построении комплексного РЛИ цели [13, 14]. Для компенсации миграции дальности по всей ширине диаграммы направленности приемной антенны РЛС обзора пространства вводится опорная функция по азимуту, которая в аналитическом виде задается следующим образом:

$$\dot{s}_{аз}(t_x) = \exp[-j4\pi(f_{нес} + F_{доп})/c \cdot R(t_x)], \quad (9)$$

где $R(t_x)$ – расстояние от цели до фазового центра синтезирования апертуры антенны для k -го азимутального направления [3, 4].

В матричном виде отсчеты сигнала (8) можно представить в виде вектор-строки длиной K :

$$\mathbf{S}_{аз[K \times 1]} = [s_{аз1} \quad \dots \quad s_{азk} \quad \dots \quad s_{азK}]^T. \quad (10)$$

Результат корреляционной обработки для i -го сечения принятого радиолокационного сигнала $\dot{\mathbf{S}}_{прм}$ по опорной азимутальной функции (9) в матричном виде будет иметь следующий вид:

$$\dot{\mathbf{S}}_{а[M \times I]} = \left[\bigcup_i (\dot{\mathbf{S}}_а^{(i)}) \right]. \quad (11)$$

где $\dot{\mathbf{S}}_{а[1 \times M]}^{(i)}$ – вектор длиной $M = 2K$ является дискретным представлением функции корреляции i -го сечения матрицы $\dot{\mathbf{S}}_{д[I \times K]}$ по K азимутальным направлениям с опорным по азимуту сигналом (10), $\dot{\mathbf{S}}_{а[1 \times M]}^{(i)} = \text{correl}[(\dot{\mathbf{S}}_д^T)^{(i)}, \dot{\mathbf{S}}_{аз}]$.

Для фокусировки комплексного РЛИ цели после описанных выше операций по i -м сечениям матрицы $\dot{\mathbf{S}}_{а[M \times I]}^T$ необходимо выполнить операцию преобразования Фурье [3, 4, 15–17]. Поскольку количества строк и столбцов матрицы $\dot{\mathbf{S}}_{а[M \times I]}^T$ задавались пропорциональными 2^I и 2^M , то для повышения оперативности вычислений может быть применена операция быстрого преобразования Фурье, которую можно представить в виде

$$\dot{\mathbf{L}}_{аз[I \times M]} = \left[\bigcup_i (\dot{\mathbf{L}}_а^{(i)}) \right]^T, \quad (12)$$

где $\dot{\mathbf{L}}_{а[1 \times M]}^{(i)}$ – вектор-столбец, содержащий элементы i -го вектор-столбца $\dot{\mathbf{S}}_{а[1 \times M]}^{(i)}$, в отношении которого проведена операция быстрого преобразования Фурье, $\dot{\mathbf{L}}_{а[1 \times M]}^{(i)} = \text{FFT}(\dot{\mathbf{S}}_а^{(i)})$.

Тогда матрица $\dot{\mathbf{L}}_{аз[I \times M]}$ является инверсно-синтезируемым комплексным РЛИ цели, которое целесообразно представить через интенсивность, путем извлечения модулей из комплексных чисел:

$$\mathbf{L}_{[I \times M]} = \left\{ |\dot{\mathbf{L}}_{аз[i, m]}| \right\}. \quad (13)$$

Для оценивания разрешающей способности по продольной Δu и поперечной Δx координатам цели на комплексном РЛИ при совместной обработке двух узкополосных ЗС, разнесенных по частоте, применялась схема построения РЛИ цели, представленная на рис. 3.

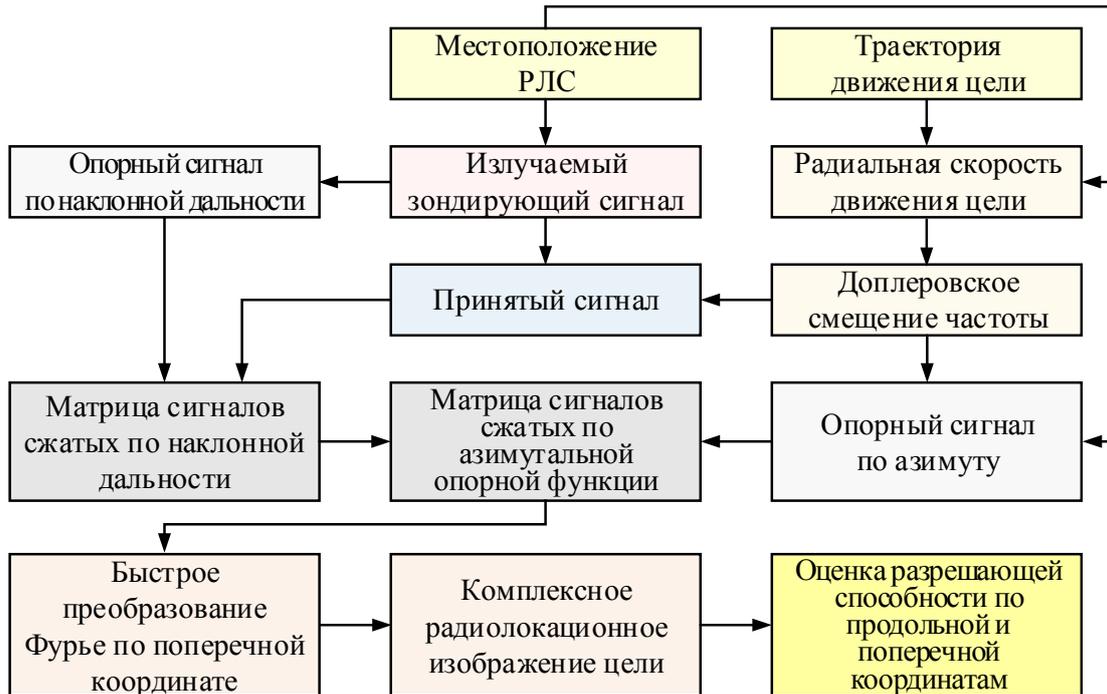


Рис. 3. Схема построения комплексного радиолокационного изображения

Учитывая, что результатом синтезирования РЛИ является матрица интенсивности принятого на интервале наблюдения $T_{\text{набл}}$ радиолокационного сигнала $\dot{S}_{\text{прм}}$, полученного после корреляционной обработки с опорным сигналом и с опорной азимутальной функцией, то для оценивания разрешающей способности РЛС обзора пространства, функционирующей в режиме ИСА, необходимо вычислить разрешающую способность по продольной Δy и поперечной Δx координатам цели, отображаемой на комплексном РЛИ. Детальность инверсно-синтезируемого РЛИ определяется количеством элементов разрешения, приходящихся на радиолокационный образ цели по продольной Δy и поперечной Δx координатам. Размер элемента разрешения по продольной координате Δy обратно пропорционален ширине полосы частот ΔF радиолокационного сигнала $\dot{s}_{\Sigma}(t)$, а по поперечной координате – обратно пропорционален величине $\psi_{\text{обз}}$ [15–17], поэтому

$$\Delta x = c/(2 \Delta F), \Delta y = \lambda_{\text{ср}}/(2 \psi_{\text{обз}}), \quad (14)$$

где $\lambda_{\text{ср}}$ – средняя длина двух узкополосных ЗС, разнесенных по частоте [8].

Разработанная модель совместной обработки двух узкополосных ЗС, разнесенных по частоте, отличается тем, что при построении инверсно-синтезируемого комплексного РЛИ движущейся цели обрабатывается аддитивный радиолокационный сигнал от цели, сформированный путем сложения отсчетов узкополосных сигналов, принятых по разным частотным каналам и прошедших синхронизацию по временным отсчетам для их дискретизации с единой частотой, позволяющий повысить разрешающую способность РЛС по наклонной дальности за счет сужения главного лепестка тела неопределенности цели, по сравнению с использованием только одного узкополосного ЗС. Модель позволяет рассчитать разрешение по продольной и поперечной координатам цели через интенсивность радиолокационного сигнала, сформированного при когерентном накоплении на интервале наблюдения цели в зоне обзора РЛС, с учетом инверсного синтезирования апертуры антенны, обусловленного поступательным движением цели относительно точки стояния РЛС обзора пространства.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИНВЕРСНО-СИНТЕЗИРУЕМОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ТОЧЕЧНОГО ОБЪЕКТА ПРИ СОВМЕСТНОЙ ОБРАБОТКЕ ДВУХ РАЗНЕСЕННЫХ ПО ЧАСТОТЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

На основе описанной выше модели совместной обработки двух узкополосных ЗС, разнесенных по частоте, при обработке в РЛС обзора пространства одиночных ЛЧМ и ФМн сигналов, а также при обработке радиолокационного сигнала $\dot{s}_\Sigma(t)$ получены реализации портретов точечного объекта, представленные на рис. 4. Входными данными при моделировании инверсно-синтезируемых изображений точечного объекта являлись: центральная частота ФМн сигнала f_1 ; центральная частота ЛЧМ сигнала f_2 ; ширина спектра каждого из двух сигналов Δf ; разнос частот первого и второго сигналов ΔF ; интервал накопления радиолокационного сигнала в режиме ИСА $T_{\text{набл}}$ в пределах сектора обзора $\psi_{\text{обз}}$. При моделировании полагалось, что параметры двух узкополосных ЗС, разнесенных по частоте, подобраны так, чтобы произведение ширины их спектров ЗС Δf_i , $i=1, 2$ на длительности ЗС $\tau_{\text{имп } i}$ были равны коэффициенту сжатия $K_{\text{сж}}$, т. е. $K_{\text{сж}} = \Delta f_i \cdot \tau_{\text{имп } i}$. Кроме того, полагалось, что $F_{\text{доп}} \approx F_{\text{доп } i}$. При проведении расчетов другие параметры радиолокационных сигналов и данные взаимного расположения объекта и средства радиолокационного наблюдения, не изменялись [8, 9].

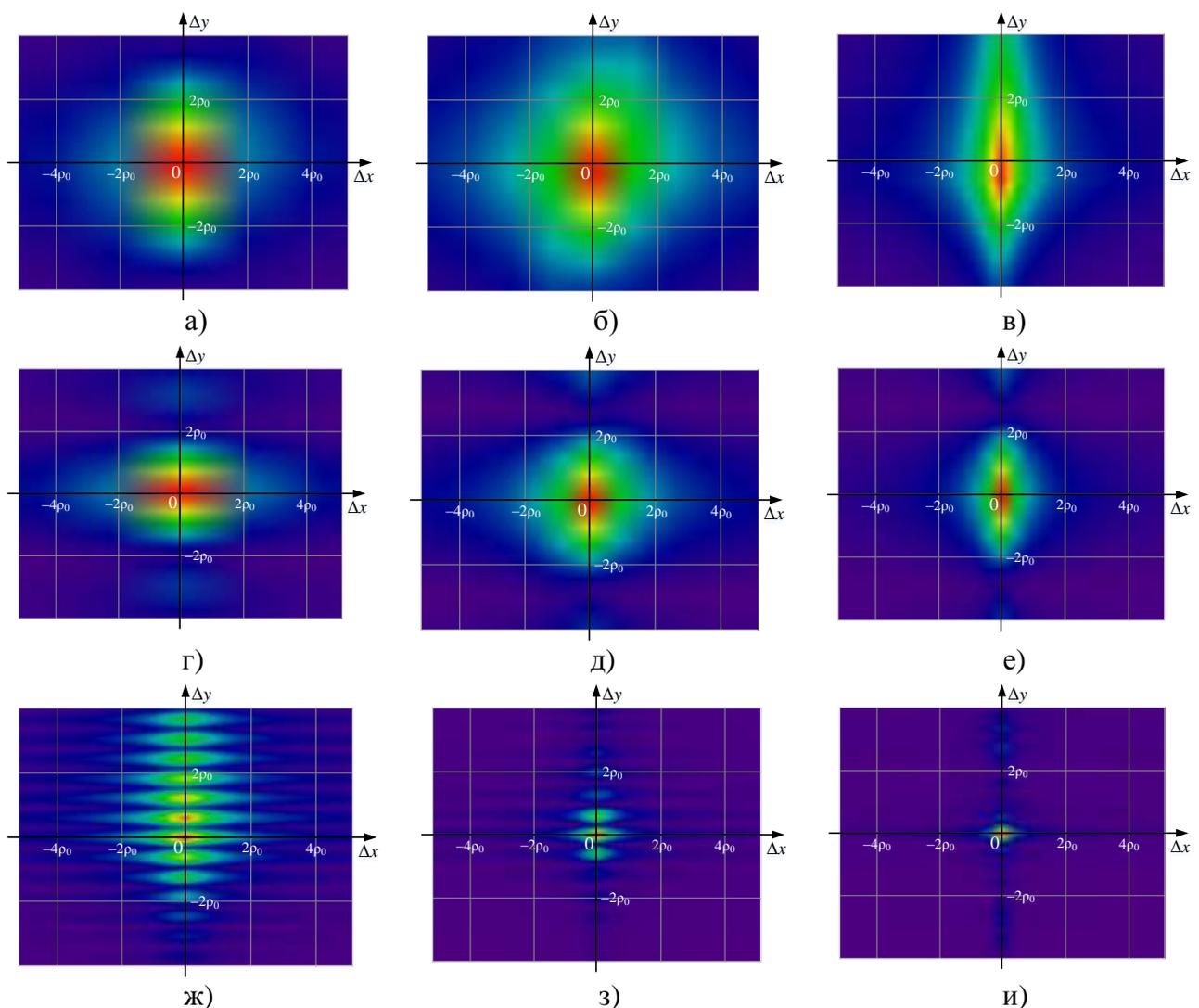


Рис. 4. Радиолокационное изображение точечного объекта

При использовании в РЛС обзора пространства одиночного узкополосного ФМн сигнала с отношением ширины спектра к центральной частоте, равной $\Delta f/f_1=2,5\%$, при изменении длительности наблюдения $T_{\text{набл}}$ получены портреты точечного объекта, представленные на рис. 4,а–в. Анализ результатов моделирования позволяет сделать вывод о том, что для одиночного ФМн ЗС при отношении ширины спектра к несущей частоте $\Delta f/f_1=2,5\%$ когерентное накопление принятого сигнала в течение $T_1 = T_{\text{набл}}$ (рис. 4,а) позволяет достичь разрешающих способностей по продольной и поперечной координатам равным $\Delta x = \Delta y = 4\rho_0$, где параметр ρ_0 определяется шириной сечения тела неопределенности точечного объекта по уровню 0,6 интенсивности накопленного радиолокационного сигнала $\dot{S}_{\text{прм}}$ после корреляционной обработки с опорным сигналом и опорной азимутальной функцией на комплексном РЛИ. Увеличение длительности накопления одиночного ФМн сигнала в два раза $T_2 = 2T_{\text{набл}}$ (рис. 4,б) приводит к повышению разрешающей способности по поперечной координате в два раза, т. е. $\Delta x = 2\rho_0$, а при $T_2 = 4T_{\text{набл}}$ (рис. 4,в) разрешающая способность по поперечной координате составляет $\Delta x = \rho_0$. При этом разрешающая способность по продольной координате остается без изменений $\Delta y = 4\rho_0$, так как разрешающая способность РЛС обзора пространства по дальности определяется шириной спектра ЗС Δf .

При совместной обработке двух узкополосных ЗС, разнесенных по частоте, при разnose их частот f_1 и f_2 на $\Delta F = \Delta f$ получены портреты точечного объекта, представленные на рис. 4,г–е. Анализ результатов моделирования позволяет сделать вывод о том, что при $\Delta F = \Delta f$ разрешающая способность по продольной координате для T_1 (рис. 4,г), T_2 (рис. 4,д) и T_3 (рис. 4,е) составляет $\Delta y = 2,67\rho_0$.

Временная корреляционная функция $B_{\Sigma}(\tau)$ обладает следующими свойствами [8]:

- увеличение разноса частот двух узкополосных ЗС, разнесенных по частоте на ΔF , при фиксировании ширины спектра первого и второго ЗС Δf приводит к увеличению количества боковых лепестков временной корреляционной функции $B_{\Sigma}(\tau)$ и сужению главного лепестка $\tau_{\text{гл}}$;

- увеличение ширины спектра двух образующих сигналов Δf при фиксированном разnose частот ΔF приводит к уменьшению количества боковых лепестков и сохранению ширины главного лепестка $\tau_{\text{гл}}$ временной корреляционной функции $B_{\Sigma}(\tau)$.

При соответствующей настройке параметров двух разнесенных по частоте ЗС $f_1, f_2, \Delta f$ и ΔF , когда достигается эффект значительного снижения боковых лепестков временной корреляционной функции $B_{\Sigma}(\tau)$ получены портреты точечного объекта при $T_3 = 4T_{\text{набл}}$, представленные на рис. 4,ж–и. Анализ результатов моделирования позволяет сделать вывод о том, что для случаев, когда разнос частот двух сигналов увеличен в четыре раза по сравнению с ранее описанной ситуацией (т. е. $\Delta F_2 = 4\Delta F$), увеличение ширины спектра каждого из двух образующих сигналов в два $2\Delta f$ и четыре $4\Delta f$ раза приводит только к уменьшению количества боковых лепестков тела неопределенности точечного объекта на комплексном РЛИ. При этом увеличение разноса частот в четыре раза $\Delta F_2 = 4\Delta F$ (рис. 4,и) позволяет повысить разрешающую способность по продольной координате Δy до $0,5\rho_0$. Поскольку для этого случая длительность когерентного накопления радиолокационного сигнала $\dot{S}_{\text{прм}}$ фиксирована и составляет $T_3 = 4T_{\text{набл}}$, то разрешающая способность по продольной координате Δx сохраняется для каждого цикла моделирования и составляет $\Delta x = \rho_0$. В результате при инверсном синтезировании комплексного РЛИ точечного объекта при совместной обработке двух узкополосных ЗС, разнесенных по частоте, достигается эффект повышения в два раза разрешающей способности по продольной координате Δy по сравнению с поперечной Δx . Очевидно, что при дальнейшем увеличении длительности накопления $T_{\text{набл}}$ радиолокационного сигнала $\dot{S}_{\text{прм}}$ значение Δx может быть увеличено до разрешающей способности по продольной координате Δy .

Для демонстрации эффекта повышения разрешающей способности точечного объекта при анализе его тела неопределенности на комплексном РЛИ при совместной обработке двух разнесенных по частоте узкополосных ЗС введем показатель

$$\delta\rho_d = \tau_{\text{гл}}/\tau_{\text{эф}}, \quad (15)$$

где $\tau_{\text{эф}}$ – эффективная длительность сигнала на выходе коррелятора.

Оценка эффективной длительности сигнала на выходе коррелятора $\tau_{\text{эф}}$ проводилась следующим образом. Для временной корреляционной функции $B_{\Sigma}(\tau)$, представленной в дискретном виде, оценка $\tau_{\text{эф}}$ проводилась по следующему аналитическому выражению [3, 18]:

$$\tau_{\text{эф}} = T \sum_{n=1}^N B_{\Sigma n}, \quad (16)$$

где $B_{\Sigma n}$ – n -й отсчет временной корреляционной функции $B_{\Sigma}(\tau)$.

При варьировании параметрами двух узкополосных ЗС, разнесенных по частоте, такими как $f_{1(2)}$, Δf и ΔF , после корреляционной обработки изменяется не только форма сигнала, но и ширина главного лепестка временной корреляционной функции $\tau_{\text{гл}}$, влияющая на разрешающую способность РЛС по дальности. Представляя параметр $\delta\rho_d$ функцией двух переменных $\delta\rho_d = 10 \cdot \lg[f(\Delta f, \Delta F)]$ получена зависимость изменения разрешающей способности по дальности в зависимости от отношения Δf к ΔF , которая представлена на рис. 5.

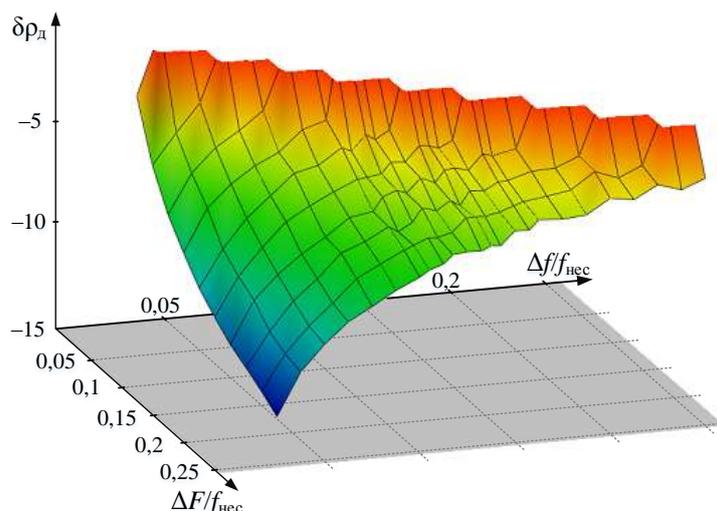


Рис. 5. Разрешающая способность по продольной координате при совместной обработке двух разнесенных по частоте радиолокационных сигналов

Анализ результатов моделирования позволяет сделать вывод о том, что на интервале $\Delta f/f_{\text{нес}}$ от 0,15 до 0,25 проявляются флуктуации величины $\delta\rho_d$, обусловленные отличиями оценок разрешающей способности по уровням боковых лепестков временной корреляционной функции $B_{\Sigma}(\tau)$ от оценок, сформированных по огибающей одиночного узкополосного ЗС. Это может учитываться при настройке параметров опорного радиолокационного сигнала при измерении местоположения точечного объекта наземной РЛС, функционирующей в режиме ИСА.

На основе инверсно-синтезируемых комплексных РЛИ точечного объекта при совместной обработке двух узкополосных ЗС, разнесенных по частоте, выявлена зависимость изменения разрешающей способности РЛС обзора пространства по дальности при изменении их ширины спектров и величины разноса частот. Выявлено, что на интервале $\Delta f/f_{\text{нес}}$ от 0,15 до 0,25 проявляются флуктуации величины $\delta\rho_d$, обусловленные отличиями разрешающей

способности по уровням боковых лепестков огибающей нормированной функции корреляции радиолокационного сигнала $B_{\Sigma}(\tau)$ от оценок, сформированных по ее огибающей одиночного узкополосного ЗС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Когерентное накопление принятых радиолокационных сигналов от цели в сочетании с ИСА позволяет в РЛС обзора пространства обеспечить высокую разрешающую способность по поперечной координате цели на ее РЛИ. Для повышения разрешающей способности РЛС по дальности целесообразно использовать широкополосные сигналы, которые могут быть сформированы путем сложения отсчетов узкополосных сигналов, принятых по разным частотным каналам и прошедших синхронизацию временных отсчетов для их дискретизации с единой частотой. На основе результатов моделирования показано, что для одинаковых интервалов наблюдения целей достигается эффект увеличения разрешающей способности по продольной координате на инверсно-синтезируемом РЛИ при реализации в РЛС обзора пространства совместной обработки двух узкополосных радиолокационных сигналов, разнесенных по частоте, по сравнению с обработкой одиночных узкополосных сигналов.

Разработана модель совместной обработки двух узкополосных радиолокационных сигналов, разнесенных по частоте, позволяющая рассчитать разрешение по продольной и поперечной координатам цели через интенсивность принятого сигнала, сформированного в результате его когерентного накопления при инверсном синтезировании апертуры антенны РЛС обзора пространства. На примере построения инверсно-синтезированного РЛИ точечного объекта продемонстрирован эффект повышения в два раза разрешающей способности по продольной координате Δy по сравнению с поперечной координатой Δx . Получена зависимость изменения разрешающей способности РЛС обзора пространства по дальности при совместной обработке двух узкополосных сигналов, разнесенных по частоте. Полученные результаты целесообразно использовать при оценивании возможностей применения РЛС обзора пространства для решения задач завязки траекторий целей, наблюдаемых при низких отношениях сигнал/шум по мощности.

Список используемых источников

1. *Верба В. С., Неронский Л. Б., Турук В. Э.* Перспективные технологии цифровой обработки радиолокационной информации космических радиолокаторов с синтезируемой апертурой / под ред. В. С. Вербы. – М. : Радиотехника, 2019. – 416 с.
2. Радиолокационные системы / под общ. ред. В. П. Бердышева. – Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2011. – 400 с.
3. *Купряшкин И. Ф., Лихачев В. П.* Космическая радиолокационная съемка земной поверхности в условиях помех. – Воронеж : Научная книга, 2014. – 460 с.
4. Локационные методы исследования объектов и сред / под ред. А. И. Баскакова. – М. : ИЦ «Академия», 2011. – 384 с.
5. *Доросинский Л. Г., Виноградова Н. С.* Теория и практика формирования и обработки радиолокационных изображений. – Екатеринбург : Уральский университет, 2021. – 232 с.
6. *Татаренков К. В., Осокин В. В.* Влияние ширины спектра зондирующего сигнала на разрешающую способность по азимуту в радиолокаторах с синтезированной апертурой антенны // Радиотехника. – 2022. – Т. 86, № 10. – С. 64–67.
7. Метод повышения разрешающей способности многопозиционных радиолокационных систем с синтезированной апертурой на основе расщепления спектра сигнала с линейной ча-

стотной модуляцией / В. С. Бахолдин [и др.] // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 670. – С. 27–31.

8. Левин Д. В., Мальцев Г. Н., Паршуткин А. В. Когерентное сложение разнодиапазонных сигналов для мониторинга космического пространства территориально разнесенными наземными комплексами // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2023. – Т. 10, № 2. – С. 73–82.

9. Левин Д. В., Паршуткин А. В., Тимошенко А. В. Достоверность селекции целей в сети разнесенных радиолокационных станций при совместной обработке радиолокационной информации в условиях ретранслированных помех // Информационно-управляющие системы. – 2022. – № 3 (118). – С. 55–66.

10. Аналитические сигналы в статистической радиотехнике / Р. В. Антипенский [и др.]. – М. : Радиотехника, 2016. – 176 с.

11. Радиолокационные характеристики объектов. Методы исследования / под ред. С. М. Нестерова. – М. : Радиотехника, 2015. – 312 с.

12. Моряков С. И., Нестеров С. М., Скородумов И. А. Результаты инверсного синтеза двумерных радиолокационных изображений объектов с автофокусировкой в широких секторах углов // Журнал радиоэлектроники. – 2020. – № 11. – С. 1884–1719.

13. Евсеев В. И., Колачев И. О. Алгоритмы формирования голограммы и изображения в космической радиолокационной станции с синтезированной антенной для маршрутного режима обзора // Вестник образования и развития науки Российской академии естественных наук. – 2022. – № 26 (3). – С. 27–37.

14. Деркачев В. А. Формирование радиолокационной сцены для моделирования радиолокационных систем с синтезированной апертурой // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2019. – № 2 (204). – С. 117–128.

15. Алгоритм формирования радиолокационных изображений космических объектов, основанный на комплексировании методов сверхразрешения / А. А. Казанцев [и др.] // 27-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь, 2017. – Т. 7. – С. 1684–1691.

16. Галеницкий А. В., Казанцев А. А., Тютюкин А. Е. Синтезирование радиолокационных изображений стабилизированных баллистических объектов // Ural Radio Engineering Journal. – 2019. – № 3 (3). – С. 306–327.

17. Алгоритм формирования радиолокационных изображений космических аппаратов со сверхразрешением на основе комплексирования спектрального оценивания и продолженной когерентной обработки / А. А. Казанцев [и др.] // Ural Radio Engineering Journal. – 2018. – № 2. – С. 67–86.

18. Гринь И. В., Ершов Р. А., Морозов О. А. Модифицированный алгоритм вычисления функции неопределенности в задаче оценки взаимных временных задержек широкополосных сигналов // Известия вузов. Радиофизика. – 2019. – Т. 62, № 10. – С. 779–786.

А. А. Борисов,
кандидат технических наук, доцент;
Ю. В. Кулешов,
доктор технических наук, профессор;
А. Б. Маков,
доктор технических наук, доцент;
Н. С. Новиков

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБСТАНОВКИ В ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОМ ОТНОШЕНИИ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ОЦЕНИВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

В статье предложен подход к моделированию обстановки в гидрометеорологическом отношении при решении задач оценивания эффективности гидрометеорологического обеспечения на основе метода статистического имитационного моделирования.

Приводятся соотношения для вычисления частных показателей качества гидрометеорологического обеспечения и разработки специализированных гидрометеорологических прогнозов.

Ключевые слова: гидрометеорологическое обеспечение, опасные явления, эффективность, качество.

ВВЕДЕНИЕ

Необходимым условием разработки качественных моделей гидрометеорологического обеспечения (ГМО) для решения задач оценивания его эффективности является предварительное определение характеристик обстановки в гидрометеорологическом отношении (ОБГМО) по району оценивания гидрометеорологических условий (ГМУ) [1, 2].

В соответствии с определением, приведенным в работе [3], под ОБГМО понимается совокупность следующих данных:

– по организациям, учреждениям и подразделениям Росгидромета и других ведомств – о составе гидрометеорологической наблюдательной сети, об обеспеченности гидрометеорологической техникой и другими материальными средствами, каналами связи, состоянии подсистем системы ГМО и др.;

– по организациям, учреждениям и подразделениям органов ГМО иностранных государств, предоставляющих гидрометеорологическую информацию (ГМИ) в рамках выполнения международных обязательств по обмену ГМИ под эгидой Всемирной метеорологической организации – о составе передаваемой ГМИ, ее качестве;

– по району проведения работ – о физико-географических условиях, фактических и прогнозируемых ГМУ.

Поскольку оценивание эффективности ГМО в работах данной направленности осуществляется в рамках теории эффективности целенаправленных процессов (ТЭЦП) [4], в настоящей работе необходимо в терминах и понятиях данной теории изложить сущность понятия «ОБГМО» и необходимость его моделирования.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБСТАНОВКИ В ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОМ ОТНОШЕНИИ

Рассмотрим структурную схему операционного комплекса, описывающего ГМО как операцию (рис. 1).

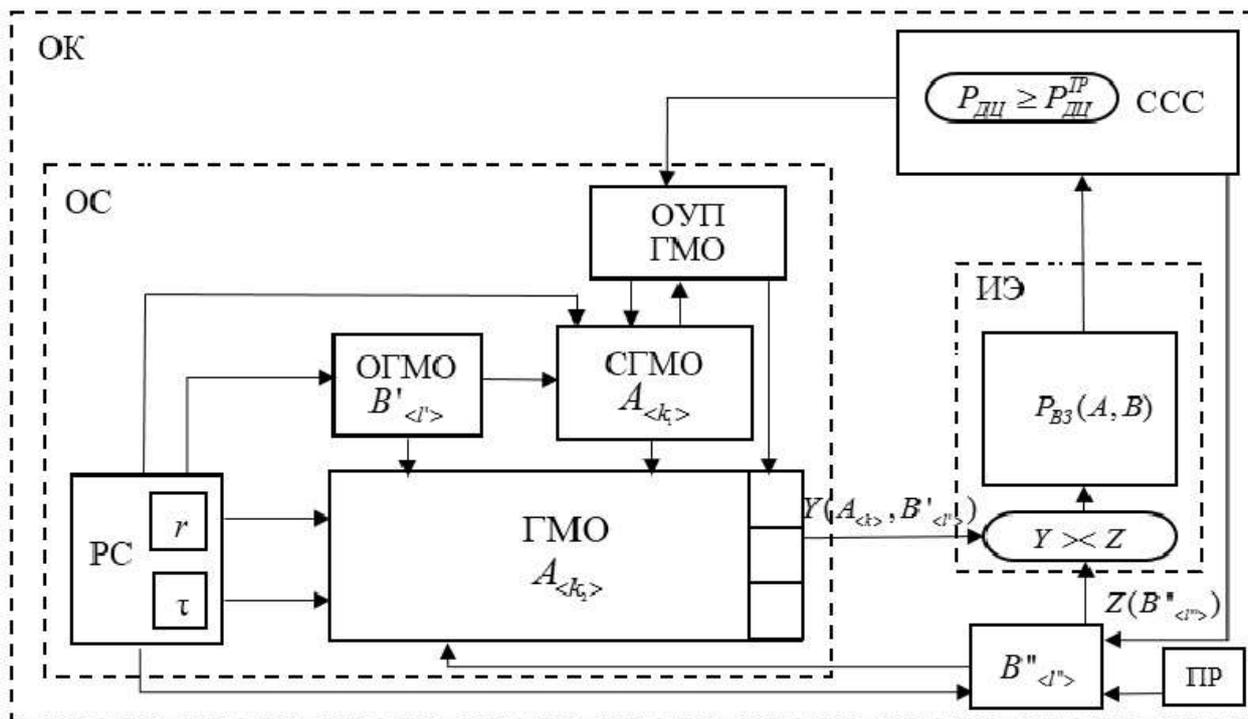


Рис. 1. Структурная схема операционного комплекса

На рис. 1 использованы следующие обозначения:

ССС – суперсистема;

ОС – операционная система;

ОК – операционный комплекс;

ОУП ГМО – орган управления ГМО;

РС – ресурсы;

ИЭ – измерительный элемент;

ПР – «противник»;

СГМО – система ГМО;

r – ресурсы, выделенные на проведение ГМО;

τ – время, в течение которого проводится ГМО.

Операция (ГМО) осуществляется СГМО под управлением ОУП ГМО. Цель операции и критерии ее достижения формулирует ССС (некоторый потребитель ГМИ). Для проведения ГМО выделены ресурсы r , которые в процессе проведения операции расходуются полностью. На проведение мероприятий ГМО выделено время τ . Система ГМО функционирует во внешней среде, случайные факторы $\hat{B}'_{<l>}$ которой влияют на параметры $A_{<k_1>}$ и $A_{<k_2>}$, обуславливая, тем самым результаты ГМО, которые можно представить в виде вектора $Y = \langle y_1, y_2, y_3 \rangle$, содержащего следующие показатели: y_1 – результативности; y_2 – ресурсоемкости; y_3 – оперативности.

Достижение цели ГМО определяется превышением (в некоторых случаях снижением) значений показателей Y некоторых граничных значений $Z = \langle z_1, z_2, z_3 \rangle$. Эти значения обуславливаются содержанием обеспечиваемой деятельности и возможностями современных технологий и средств ГМО. На показатели Z оказывают влияние факторы $\hat{B}''_{<l''>}$, имеющие организационно-ситуационное происхождение [4].

Поскольку показатели \hat{Y} и \hat{Z} имеют вероятностную природу, далее вычисляется вероятность события $P_{ВЗ} = P(\hat{Y} \leq \hat{Z})$. После этого суперсистема оценивает достижимость цели с помощью выражения $P_{ДЦ} \geq P_{ДЦ}^{ТР}$.

Потребность в нахождении характеристик $B'_{\langle l \rangle}$ ОГМО объясняется тем, что они оказывают влияние на параметры $A_{\langle k_1 \rangle}$ системы ГМО и $A_{\langle k_2 \rangle}$ ГМО [4, 5]:

$$A_{\langle k \rangle} = A_{\langle k \rangle}(B'_{\langle l \rangle}), \quad (1)$$

где $A_{\langle k \rangle}$ – вектор параметров СГМО и ГМО, $A_{\langle k \rangle} = \langle A_{\langle k_1 \rangle}, A_{\langle k_2 \rangle} \rangle$;
 $B'_{\langle l \rangle}$ – характеристики ОГМО.

Выражение (1) задает операционный функционал [4]:

$$\begin{aligned} y_2 &= y_2(A_{\langle k \rangle}, B'_{\langle l \rangle}), \\ y_3 &= y_3(A_{\langle k \rangle}, B'_{\langle l \rangle}; y_2), \\ y_1 &= y_1(A_{\langle k \rangle}, B'_{\langle l \rangle}; y_2, y_3), \end{aligned} \quad (2)$$

определяющий значения показателей результатов ГМО.

Ввиду актуальности проблемы оценивания характеристик ОГМО при решении задач оценивания эффективности ГМО необходимо оценить состав $B'_{\langle l \rangle}$, способы их вычисления, а также определить вид зависимости (1), т. е. разработать модель ОГМО.

Конкретные состав и содержание $B'_{\langle l \rangle}$ определим, исходя из следующих первоначальных посылок:

- цели ГМО достигаются путем предоставления потребителям гидрометеорологической продукции (фактической, прогностической, климатической), на основе которой они могут планировать свои действия в различных ГМУ;

- качество гидрометеорологической продукции определяется качеством первичной ГМИ, качеством методов вторичной обработки (прогнозирования, климатической обработки и т. д.) и профессионализмом специалиста-гидрометеоролога. Среди перечисленных факторов первый, несомненно, является наиболее существенным;

- для разработки гидрометеорологической продукции с требуемым качеством необходим некоторый минимальный объем первичной ГМИ – информационный минимум [6], который представлен, в основном, в виде карт погоды: приземных и барической топографии;

- качество ГМИ, представленной в виде карт погоды, существенно зависит от качества первичной ГМИ, представленной в виде фактических приземных и высотных карт погоды, а также от качества используемых методов ее обработки;

- для разработки приземных карт и карт барической топографии используется первичная ГМИ, поступившая с метеорологической и аэрологической наблюдательных сетей. Ее качество зависит от многих факторов, но к атрибутивным следует отнести плотность наблюдательной сети, ее работоспособность, наличие и работоспособность дополнительных источников ГМИ (МИСЗ, МРЛ), способных частично или полностью компенсировать недостаточную плотность наблюдательной сети.

Логика проведения дальнейших исследований такова. Исходя из содержания сделанных посылок, полагаем параметрами $A_{\langle k \rangle}$ модели ГМО следующие показатели качества первичной ГМИ: среднюю квадратическую ошибку давления на уровне моря $\sigma_{ум}$ и геопотенциала на основных изобарических поверхностях $\sigma_{от}$; среднюю квадратическую ошибку прогноза

давления на уровне моря $\sigma_{\text{прум}}$ и геопотенциала на основных изобарических поверхностях $\sigma_{\text{прбт}}$; показатели успешности гидрометеорологической продукции (для прогнозов ГМУ – оправдываемость Q метода прогнозирования); показатель профессионализма специалиста-метеоролога PRF . Эти параметры определяют результаты операции $Y_{\langle 3 \rangle}$ ГМО:

$$Y_{\langle 3 \rangle} = f_{\langle 3 \rangle}(\sigma_{\text{ум}}, \sigma_{\text{бт}}, \sigma_{\text{прум}}, \sigma_{\text{прбт}}, Q, PRF) = f_{\langle 3 \rangle}(A_{\langle k_1 \rangle}, A_{\langle k_2 \rangle}, A_{\langle k_3 \rangle}),$$

где $A_{\langle k_1 \rangle}$ – параметры модели ГМО, характеризующие качество фактической ГМИ,
 $A_{\langle k_1 \rangle} = \langle \sigma_{\text{ум}}, \sigma_{\text{бт}} \rangle$;
 $A_{\langle k_2 \rangle}$ – параметры модели ГМО, характеризующие качество прогностической ГМИ,
 $A_{\langle k_2 \rangle} = \langle \sigma_{\text{прум}}, \sigma_{\text{прбт}} \rangle$;
 $A_{\langle k_3 \rangle}$ – параметры модели ГМО, характеризующие качество метода прогнозирования и выполнения работ специалистом-метеорологом, $A_{\langle k_3 \rangle} = \langle Q, PRF \rangle$.

С другой стороны, $A_{\langle k \rangle}$ зависимы, согласно выражения (1), от $\hat{B}'_{\langle l \rangle}$. Выявим составляющие данного вектора, проанализировав влияние характеристик ОГМО на параметры $A_{\langle k \rangle}$.

Известно, что качество первичной ГМИ существенно зависит от плотности наблюдательной сети (метеорологической, радиолокационной, аэрологической и др.). При оценивании оптимальности метеорологической сети используется индекс плотности станций – величина, характеризующая на какую площадь рассматриваемой территории приходится один пункт наблюдений [7]. Необходимо оговориться, что данный показатель оптимальности учитывает лишь размещение станций на некоторой территории, не учитывая качество самих наблюдений.

Количество наблюдательных пунктов и порядок их размещения на рассматриваемой территории, определяется, прежде всего, масштабами наблюдаемых в атмосфере процессов и явлений погоды, нуждающихся в мониторинге. Нормативное число метеорологических станций для рассматриваемой территории с учетом требований по плотности размещения станций рассчитывается по формуле [7]

$$n^{\text{норм}} = \frac{S}{in_p}, \quad (3)$$

где in_p – индекс плотности метеостанций, согласно рекомендациям ВМО;
 S – площадь территории в тыс. км².

Из выражения (3) видно, что с уменьшением числа $n^{\text{норм}}$ индекс плотности in_p будет возрастать, т. е. увеличится площадь территории, обслуживаемая одной станцией. Это приведет к ухудшению параметров модели ГМО $A_{\langle k_1 \rangle}$, описывающих качество фактической ГМИ.

Факторы $\hat{B}'_{\langle l \rangle}$ по источнику возникновения условно можно разделить на факторы природного $\hat{B}'_{\langle l \rangle}^{\text{пр}}$ и антропогенного $\hat{B}'_{\langle l \rangle}^{\text{ан}}$ происхождения. К факторам $\hat{B}'_{\langle l \rangle}^{\text{пр}}$ и $\hat{B}'_{\langle l \rangle}^{\text{ан}}$, влияющим на функционирование станций метеорологической сети, относятся соответственно опасные и стихийные гидрометеорологические явления и результаты деятельности человека, негативно влияющие:

– на функционирование приборов и оборудования, размещенных на станции;

– на целостность линий электропередач, обеспечивающих работоспособность группы станций;

– на функционирование линий связи, обеспечивающих передачу ГМИ и др.

Конкретные перечень и критерии опасных и стихийных гидрометеорологических явлений устанавливается территориальными управлениями Росгидромета. В качестве примера типовой перечень и критерии опасных и стихийных гидрометеорологических явлений (ОЯ) по Санкт-Петербургу, включая г. Кронштадт, г. Ломоносов, г. Павловск, Пушкинский и Колпинский районы [8], приведены в табл. 1.

Таблица 1

Типовой перечень и критерии опасных явлений

Наименование ОЯ	Характеристики и критерии или определение ОЯ
Очень сильный ветер	Ветер при достижении скорости при порывах не менее 25 м/с или средней скорости не менее 20 м/с; на побережьях морей и в горных районах 35 м/с или средней скорости не менее 30 м/с
Ураганный ветер (ураган)	Ветер при достижении скорости 33 м/с и более
Шквал	Резкое кратковременное (в течение нескольких минут, но не менее 1 мин) усиление ветра до 25 м/с и более
Смерч	Сильный маломасштабный вихрь в виде столба или воронки, направленный от облака к подстилающей поверхности
Сильный ливень	Сильный ливневый дождь с количеством выпавших осадков не менее 30 мм за период не более 1 ч
Очень сильный дождь	Выпавший дождь, ливневый дождь, дождь со снегом, мокрый снег с количеством не менее 50 мм, в ливнеопасных (селеопасных) горных районах – не менее 30 мм за период времени не более 12 ч
Очень сильный снег	Выпавший снег, ливневый снег с количеством не менее 20 мм за период времени не более 12 ч
Продолжительный сильный дождь	Дождь с короткими перерывами (не более 1 ч) с количеством осадков не менее 100 мм (в ливнеопасных районах с количеством осадков не менее 60 мм) за период времени более 12 ч, но менее 48 ч, или 120 мм за период времени более 2 сут.
Крупный град	Град диаметром 20 мм и более
Сильное гололедно-изморозевое отложение	Диаметры отложения на проводах: гололеда – не менее 20 мм; сложного отложения или мокрого (замерзающего) снега – не менее 35 мм; изморози – не менее 50 мм

К факторам антропогенного происхождения $\hat{B}_{\langle I'_m \rangle}^{\text{ан}}$ можно отнести повреждение опор ЛЭП, механическое повреждение проводов и изоляторов из-за действий человека, ухудшение самочувствия метеонаблюдателя, проводящего метеорологические наблюдения и др.

В настоящей работе будет рассмотрено влияние лишь факторов природного происхождения. Так к $\hat{B}_{\langle I'_k \rangle}^{\text{пр}}$, негативно влияющим на функционирование метеорологической сети, можно отнести все перечисленные в табл. 1 явления, а также их следующие комплексы:

- гололедно-изморозевые отложения и максимальная скорость ветра;
- выпадение мокрого снега, сопровождающееся последующим резким понижением температуры;
- гроза любой интенсивности и др.

Моделирование появления $\hat{B}_{\langle I_k \rangle}^{\text{мп}}$ в задачах оценивания эффективности ГМО [2] можно проводить с помощью метода обратной функции [9]. Для этого необходимо первоначально на архивном материале метеорологических наблюдений либо полученных прогностических данных установить вид статистической функции распределения $F_{\hat{B}_{\langle I_k \rangle}^{\text{мп}}}(B_{\langle I_k \rangle}^{\text{мп}})$ для каждого ожидаемого ОЯ. Далее, используя датчик случайных чисел, моделируется вероятность наступления события $\hat{B}_{\langle I_k \rangle}^{\text{мп}}$. Затем с помощью соотношения

$$B_{\langle I_k \rangle}^{\text{мп}} = F_{\hat{B}_{\langle I_k \rangle}^{\text{мп}}}^{-1}(p), \quad (4)$$

где p – вероятность осуществления $\hat{B}_{\langle I_k \rangle}^{\text{мп}}$, можно получить оценки вектора $\hat{B}_{\langle I_k \rangle}^{\text{мп}}$, характеризующего обстановку в гидрометеорологическом отношении в конкретное время. Периоды, для которых необходимо оценивать $\hat{B}_{\langle I_k \rangle}^{\text{мп}}$, устанавливаются, исходя из продолжительности обеспечиваемой операции.

ПРИМЕР МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБСТАНОВКИ В ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОМ ОТНОШЕНИИ

Рассмотрим следующий пример моделирования ОБГМО. Допустим, что в период проведения некоторой погодозависимой операции, исходя из анализа климатического описания района, ожидается очень сильный ветер с вероятностью $p_B = 0,75$ и сильное гололедно-изморозевое отложение с вероятностью $p_{\text{ги}} = 0,6$. Их совместное появление или одиночное каждого из них приводит к обрыву проводов ЛЭП и выходу из строя линий связи. Это является причиной снижения качества первичной ГМИ и, как итог, качества выходной гидрометеорологической продукции, разрабатываемой для района проведения операции. Смоделируем соответствующую ОГМО.

Согласно теореме сложения вероятностей двух событий, вероятность появления либо сильного ветра, либо сильного гололедно-изморозевого отложения, либо обоих явлений вместе определяется следующим выражением:

$$P(V + GI) = P(V) + P(GI) - P(V \cdot GI), \quad (5)$$

- где $P(V)$ – вероятность появления ОЯ «сильный ветер»;
- $P(GI)$ – вероятность появления ОЯ «сильное гололедно-изморозевое отложение»;
- $P(V \cdot GI)$ – вероятность совместного появления этих ОЯ.

Так как рассматриваемые ОЯ являются независимыми, выражение (5) можно переписать следующим образом:

$$P(V + GI) = P(V) + P(GI) - P(V)P(GI). \quad (6)$$

В моделируемой ситуации $P(V + GI) = 0,9$. Тогда эмпирическая функция распределения явления $P(V + GI)$ будет иметь вид, представленный на рис. 2.

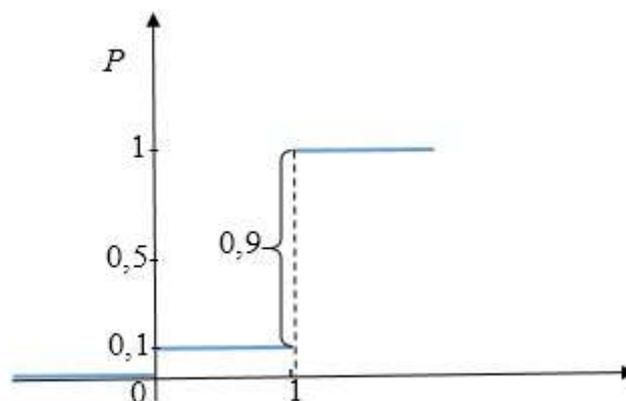


Рис. 2. Эмпирическая функция распределения явления $P(V + GI)$

Используя генератор случайных чисел, получаем значения на отрезке $[0;1]$. Если сгенерированное значение принадлежит интервалу $[0,1;1,0]$, то делается вывод о наступлении события $P(V + GI)$ на всей территории проведения операции или некоторой ее части. Полученные результаты моделирования далее необходимо использовать в выражении (1) для нахождения оценок параметров СГМО и ГМО.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Очевидно, что ГМО как целенаправленный процесс нуждается в оценивании эффективности его проведения. Поскольку реализующая ГМО система функционирует во внешней среде, чье воздействие на агрегаты данной системы происходит непрерывно и не может быть в полной мере нивелировано усилиями разработчиков и эксплуатационников системы, то данное воздействие должно быть учтено при получении оценок эффективности.

Поскольку в настоящей работе при оценивании эффективности ГМО использовался методологический аппарат ТЭЦП, в употребление было введено понятие ОБГМО, описывающее факторы внешней среды, влияющие на параметры эксплуатируемой системы и проводимой ей операции, т. е. были сформулированы условия функционирования СГМО.

При разработке модели ОБГМО авторами был рассмотрен ограниченный перечень влияющих факторов с целью улучшения восприятия представленного материала. При решении задач оценивания эффективности ГМО реальных операций перед исследователями возникнет новая самостоятельная задача, требующая решения, а именно определение факторов внешней среды, оказывающих определяющее влияние на параметры СГМО и ГМО.

Список используемых источников

1. Борисов А. А., Кулешов Ю. В., Маков А. Б. Метод оценивания эффективности прогнозирования гидрометеорологических условий при обеспечении боевых действий // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2022. – Вып. 685. – С. 33–38.
2. Борисов А. А., Маков А. Б., Шукин Г. Г. Моделирование показателя эффективности активных воздействий на слоистообразные облака при обеспечении благоприятных погодных условий проведения воздушной части общественно значимых мероприятий // Навигация и гидрография. – 2022. – № 67. – С. 66–89.
3. Борисов А. А., Маков А. Б., Новиков Н. С. Методология оценивания эффективности метеорологического обеспечения полетов государственной авиации // Состояние и перспек-

тивы развития современной науки по направлению «Новые материалы и энергетика в ВС РФ»: сб. ст. науч.-техн. конф. – Анапа : Военный инновационный технополис «ЭРА», 2023. – С. 66–71.

4. *Петухов Г. Б., Якунин В. И.* Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремленных систем. – М. : АСТ, 2006. – 506 с.

5. *Борисов А. А., Маков А. Б., Суворов С. С.* Модель показателя эффективности гидрометеорологического обеспечения при решении задач прогнозирования гидрометеорологических условий // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2020. – Вып. 674. – С. 117–122.

6. РД 52.27.723 – 2009. Базовые требования к технологии подготовки краткосрочных прогнозов погоды. – Обнинск : ИГ–СОЦИН, 2009. – 38 с.

7. Методика расчета минимально необходимого количества пунктов метеорологических наблюдений. – СПб., 2008. – 15 с.

8. Перечень опасных природных явлений и их критериев по Санкт-Петербургу, включая г. Кронштадт, г. Ломоносов, г. Павловск, Петродворцовый, Пушкинский и Колпинский районы. – URL: <http://www.meteo.nw.ru/articles/index.php?id=759> (дата обращения: 05.04.2024)

9. Статистические методы в прикладной кибернетике / В. И. Городецкий [и др.]. – М. : МО СССР, 1980. – 377 с.

И. Д. Веселов¹;
И. Ю. Еремеев²,
доктор технических наук, профессор;
Л. А. Овчаренко³,
доктор технических наук;
С. С. Семенюк⁴,
кандидат технических наук, доцент

^{1, 2, 4} Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург.

³ «Центр системного анализа и моделирования» –
филиал АО «Научно-технический центр радиоэлектронной борьбы», г. Санкт-Петербург.

РАСПОЗНАВАНИЕ РАДИОИЗЛУЧЕНИЙ СРЕДСТВ СВЯЗИ, ФУНКЦИОНИРУЮЩИХ В РЕЖИМЕ MIMO-OFDM

В статье рассмотрены особенности формирования OFDM сигналов, передаваемых в режиме пространственно-временного и пространственно-частотного кодирования в системах связи и передачи данных. Предложен подход к распознаванию сигналов OFDM, применяемых в режиме пространственного кодирования, основанный на выявлении и оценивании пилотных символов в структуре OFDM сигнала.

Ключевые слова: источник радиоизлучения, OFDM, MIMO, пространственное кодирование.

ВВЕДЕНИЕ

Тенденции развития современных систем связи и передачи данных состоят в реализации принципов сигналаобразования, позволяющих повысить эффективность использования частотно-временного ресурса и помехозащищенности канала связи [7]. Одним из них является совместное применение технологии OFDM (англ. *Orthogonal frequency division multiplexing* – мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов) и MIMO (англ. *Multiple Input and Multiple Output* – множественный вход и множественный выход).

Системы MIMO предусматривают наличие на передающем и приемном оборудовании многоканальных разнесенных антенных систем и передачу сигналов с использованием пространственного кодирования [2]. Технологии OFDM и MIMO широко используются при организации радиосвязи и передачи данных в таких стандартах связи как DVB-T, LTE, Wi-Fi, WiMAX [1, 2, 3], в частности, модификации указанных стандартов используются производителями БпЛА для построения радиолиний управления, телеметрии и передачи целевой информации.

Адаптация параметров и режимов функционирования современных средств связи к текущей радиоэлектронной обстановке в районе применения по назначению базируется на результатах ее оперативного мониторинга.

Анализ публикаций отечественных и зарубежных авторов в области адаптации средств радиосвязи к радиоэлектронной обстановке в районе их применения свидетельствует о значительном числе работ, посвященных вопросам оценивания различных параметров сигналов OFDM. При этом вопросы устранения неопределенности относительно применения пространственно-временного или пространственно-частотного кодирования не рассматривались [7, 8, 9].

Таким образом, целью исследований является разработка информативного признака для обнаружения факта применения пространственного кодирования OFDM сигналов.

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ OFDM СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ MIMO

Систему с MIMO, состоящую из передатчика, имеющего N_t антенн, и приемника, имеющего N_r антенн, можно изобразить в виде, представленном на рис. 1 [1].

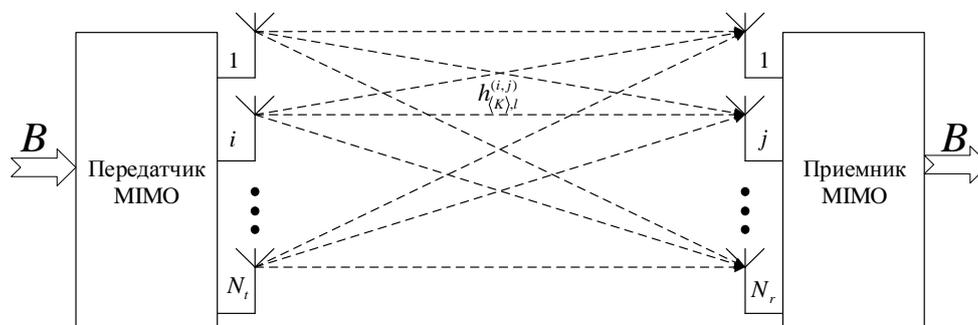


Рис. 1. Схема приемо-передающей системы с MIMO

Принцип пространственного кодирования состоит в использовании нескольких разнесенных в пространстве антенн для передачи сообщения. Однако для предотвращения негативных последствий от эффекта интерференции выполняется преобразование сигналов, обеспечивающее возможность их разделения на приемной стороне в условиях многолучевого распространения. Такие преобразования включают расщепление потока информационных символов, их отображение в пространстве сигнальных элементов, а также частотное или временное разнесение.

Для описания среды распространения сигнала от i -й антенны передатчика к j -й антенне приемника используется комплексный коэффициент передачи канала $h_{(K),l}^{(i,j)}$ (канальный коэффициент). В общем случае канальные коэффициенты изменяются в зависимости от условий распространения радиоволн. Однако на интервале передачи нескольких OFDM слов их можно считать неизменными. Учитывая тот факт, что канал связи для широкополосных сигналов является частотно-селективным, для описания среды распространения от i -й антенны передатчика к j -й антенне приемника на интервале передачи l -го OFDM-слова совокупность канальных коэффициентов для K значащих поднесущих можно представить в виде столбца

$$h_{(K),l}^{(i,j)} = [h_{1,l}^{(i,j)}, h_{2,l}^{(i,j)}, \dots, h_{K,l}^{(i,j)}]^T. \quad (1)$$

Тогда для описания всей системы OFDM–MIMO матрица канальных коэффициентов для l -го OFDM-слова имеет вид

$$H_{(K),l}^{[N_t, N_r]} = [h_{(K),l}^{(i,j)}], [i = 1(1)N_t], [j = 1(1)N_r]. \quad (2)$$

В стандартах связи, использующих технологии OFDM и MIMO для оптимизации процесса передачи и приема данных, информация передается кадрами, каждый из которых включает L слов. Кадровая структура передачи создает условия для эффективной реализации процедур слежения за несущей и тактовой частотами, оценивания канальных искажений.

На рис. 2 представлена схема формирования OFDM слов для системы MIMO с двумя передающими антеннами.

Исходный поток данных представляет собой последовательность двоичных информационных символов $\langle b_1, b_2, \dots \rangle$, $b \in \{0, 1\}$. Исходный поток разбивается на неперекрывающиеся сегменты по ν символов, где $\nu = \log_2 m$, m – позиционность используемого вида модуляции на поднесущих колебаниях. Каждой ν -элементной комбинации ставится в соответствие

комплексный модуляционный символ из состава используемого сигнального созвездия. Таким образом, из последовательности информационных символов формируется последовательность канальных комплексных модуляционных символов $\langle \dot{a}_1, \dot{a}_2, \dot{a}_3, \dots \rangle$, состоящая из элементов используемого сигнального созвездия $C_{[vM, m]} = \{ \dot{c}_1, \dot{c}_2, \dots, \dot{c}_m \}$, $\dot{a} \in C$, vM – вид модуляции (например ФМн-М, КАМ-М). Последовательность канальных комплексных модуляционных символов делится во временной области на блоки по Z элементов, которые распределяются по K значимым поднесущим колебаниям ($K > Z$).

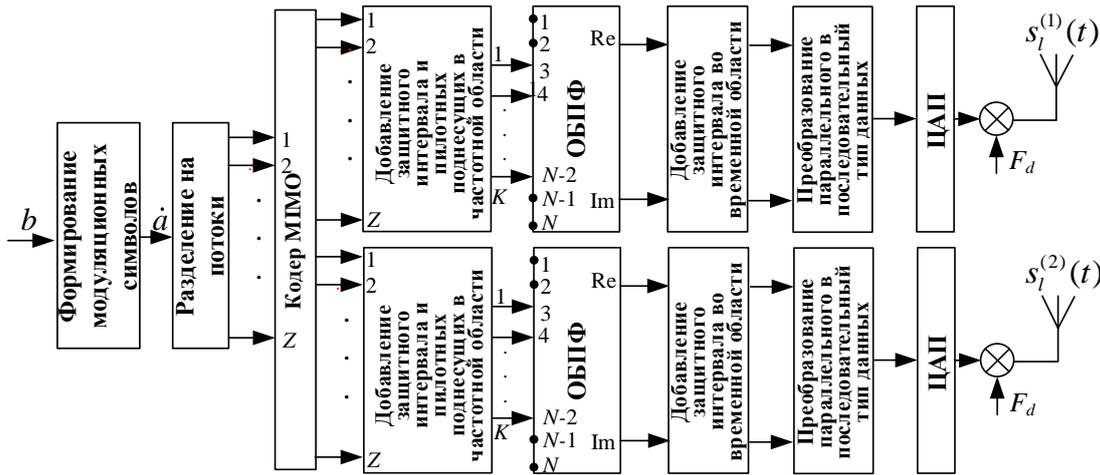


Рис. 2. Схема формирования OFDM сигнала с поддержкой MIMO 2×1

Поток модуляционных символов на Z информационных частотах на интервале наблюдения L OFDM-слов, образующих один временной кадр, можно представить в виде матрицы спектральных коэффициентов:

$$A_{[Z, L]} = \begin{bmatrix} \dot{a}_{1,1} & \dot{a}_{1,2} & \dots & \dot{a}_{1,L} \\ \dot{a}_{2,1} & \dot{a}_{2,2} & \dots & \dot{a}_{2,L} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dot{a}_{Z,1} & \dot{a}_{Z,2} & \dots & \dot{a}_{Z,L} \end{bmatrix} \quad (3)$$

В кодере MIMO, в зависимости от выбранного метода и схемы пространственного кодирования, из исходной последовательности канальных комплексных модуляционных символов $A_{[Z, \infty]}$ в соответствии с функцией пространственного кодирования $f^{(ПК)}$ формируются пространственно-кодированные последовательности модуляционных символов для i -й антенны:

$$A_{[Z, L]}^{ПК(i)} = f^{(ПК)}(A_{[Z, L]}, i), \quad (4)$$

$$A_{[Z, L]}^{ПК(i)} = [\dot{a}_{z,l}^{ПК(i)}], \dot{a}_{z,l}^{ПК(i)} = f^{(ПК)}([\dot{a}_{z,l}], i, z, l), \quad (5)$$

где z – номер информационного модуляционного символа;
 l – номер OFDM слова.

Вид и параметры $f^{(ПК)}$ определяются вариантом реализуемого пространственно-временного или пространственно-частотного кодирования:

$$\dot{a}_{z,l}^{\text{ПВК}(i)} = f^{\text{ПВК}} \left(\left\{ \dot{a}_{z,l}, \dot{a}_{z,l-1}, \dots, \dot{a}_{z,l-D+1} \right\}, i, l \right); \quad (6)$$

$$\dot{a}_{z,l}^{\text{ПЧК}(i)} = f^{\text{ПЧК}} \left(\left\{ \dot{a}_{z,l}^{(i)}, \dot{a}_{z-1,l}^{(i)}, \dots, \dot{a}_{z-D+1,l}^{(i)} \right\}, i, z \right). \quad (7)$$

где D – число столбцов пространственного кода кодера ММО.

Важной особенностью формирования OFDM сигналов, передаваемых с использованием технологии ММО, является добавление пилотных поднесущих, на которых осуществляется передача эталонной (известной на приемной стороне) последовательности модуляционных символов $A_{\{P,L\}}^{(i,\text{пил})}$, с помощью которой осуществляется оценка коэффициентов передачи канала на всех поднесущих OFDM слова с заданной периодичностью. Стоит отметить, что значения набора пилотных модуляционных символов различно для каждого OFDM слова, при этом одинаково для всех OFDM кадров. Матрицу значений элементов пилотной модуляционной последовательности i -й антенны для P пилотных поднесущих OFDM кадра, состоящего из L слов, можно записать в виде:

$$A_{\{P,L\}}^{(i,\text{пил})} = \begin{bmatrix} \dot{a}_{1,1}^{(i,\text{пил})} & \dot{a}_{1,2}^{(i,\text{пил})} & \dots & \dot{a}_{1,L}^{(i,\text{пил})} \\ \dot{a}_{2,1}^{(i,\text{пил})} & \dot{a}_{2,2}^{(i,\text{пил})} & \dots & \dot{a}_{2,L}^{(i,\text{пил})} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dot{a}_{P,1}^{(i,\text{пил})} & \dot{a}_{P,2}^{(i,\text{пил})} & \dots & \dot{a}_{P,L}^{(i,\text{пил})} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Представим поток передаваемых пространственно-кодированных информационных модуляционных символов в виде совокупности последовательных кадров $A_{\{Z,L\}}^{(i,\alpha)} = \left[A_{\{Z,L\}}^{\text{ПК}(i)} \right]_{\alpha}$, где $\alpha = 1(1)A$ – номер кадра, A – количество кадров на интервале наблюдения.

При формировании OFDM слов формируются защитные интервалы в частотной области. Представим матрицу значений спектральных коэффициентов $A_{\{W,L\}}^{(\text{заш})}$ на интервале L слов в виде поднесущих с нулевой амплитудой, а именно:

$$A_{\{W,L\}}^{(\text{заш})} = \mathbf{0}_{[W,L]}, \quad (9)$$

где $\mathbf{0}_{[W,L]}$ – нулевая матрица, размерности $W \times L$;

W – количество нулевых отсчетов в спектре OFDM слова.

Тогда модуляционные символы, поступающие на ОБПФ, с учетом защитного интервала в частотной области $A_{\{W,L\}}^{(\text{заш})}$ имеют вид

$$S_{\{N,L\}}^{(i,\alpha)} = A_{\{Z,L\}}^{(i,\alpha)} \cup A_{\{P,L\}}^{(i,\text{пил})} \cup A_{\{W,L\}}^{(\text{заш})}, \quad (10)$$

где N – размер ОБПФ, $N = Z + P + W$, $N = 2^n$.

На $K = Z + P$ значащих поднесущих передаются только пилотные и информационные модуляционные символы, т. е.

$$S_{\{K,L\}}^{(i,\alpha)} = A_{\{Z,L\}}^{(i,\alpha)} \cup A_{\{P,L\}}^{(i,\text{пил})} \quad (11)$$

где K – количество значащих поднесущих, $K = Z + P$.

На практике для обеспечения высокой помехоустойчивости при передаче пилотных модуляционных символов используется двоичная фазовая модуляция (ФМ-2), а для обеспечения высокой скорости передачи в канале связи на информационных поднесущих применяются

другие виды модуляции, например КАМ-16, КАМ-64, КАМ-256. Число и порядок размещения пилотных поднесущих различны в разных системах связи, в которых применяется технология ММО. Для оценивания канальных коэффициентов от i -й передающей антенны, при наличии пилотных символов, с i -й антенны на k -й частоте с других антенн на этой частоте ничего не передается (рис. 3). То есть в структуре сигнала на позициях пилотных поднесущих одной антенны излучения от другой антенны отсутствуют.

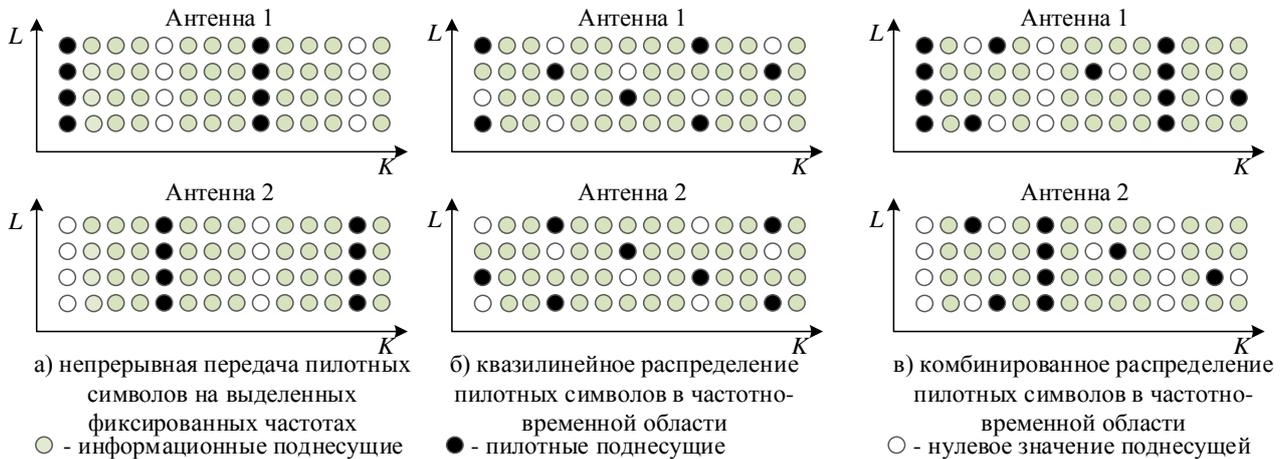


Рис. 3. Варианты распределения пилотных поднесущих в OFDM словах, передаваемых с двух антенн

Например, в стандарте WiMax (IEEE 802.16e-2005, 2009) порядок расположения пилотных поднесущих представлен на рис. 4 и различен для четырех последовательных OFDM слов.

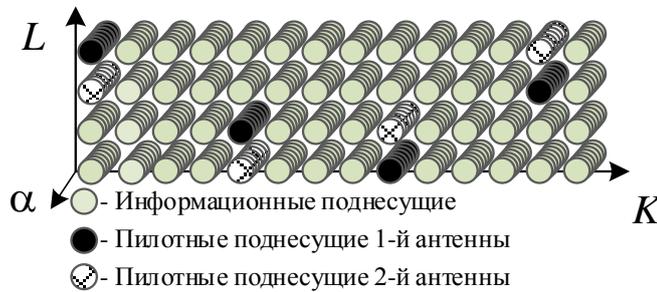


Рис. 4. Распределение пилотных поднесущих по стандарту WiMax

Особенности применения пилотных поднесущих для оценки канала связи и неизменность порядка их размещения от кадра к кадру могут являться признаком для выявления факта пространственного кодирования и применения технологии ММО.

Рассмотрим комплексную спектрограмму OFDM кадра, состоящего из восьми слов ($L=8$) и шестнадцати поднесущих ($N = 16$), при этом защитный интервал в частотной области равен 2 ($W=2$). Предположим, что на передатчике используется две передающие антенны, а порядок расположения пилотных поднесущих соответствует порядку, определенному стандартом WiMax. Допустим, что при приеме сигнала отсутствует рассогласование по времени и частотному сдвигу, при этом имеется неопределенность в значении фазы принимаемых сигналов при формировании оценки спектральных коэффициентов. Для формирования пилотных модуляционных символов используется двоичная фазовая модуляция $\dot{a}_{p,l}^{(i,mmt)} \in vM_{[ФМ,2]}$ (ФМ-2), а для информационных – $\dot{a}_{z,l} \in vM_{[КАМ,16]}$ (КАМ-16). Тогда комплексная спектрограмма α -го кадра передаваемого с i -й антенны будет иметь вид:

$$S_{[N,L]}^{(i,\alpha)} = \begin{bmatrix} 0 & \dot{a}_{1,1}^{(i,\text{пил})} & \dot{s}_{1,1}^{(i)} & \dot{s}_{2,1}^{(i)} & \dot{s}_{3,1}^{(i)} & \dot{s}_{4,1}^{(i)} & \dot{s}_{5,1}^{(i)} & \dot{s}_{6,1}^{(i)} & \dot{s}_{7,1}^{(i)} & \dot{s}_{8,1}^{(i)} & \dot{s}_{9,1}^{(i)} & \dot{s}_{10,1}^{(i)} & \dot{s}_{11,1}^{(i)} & \dot{a}_{2,1}^{(i,\text{пил})} & \dot{s}_{12,1}^{(i)} & 0 \\ 0 & \dot{a}_{1,2}^{(i,\text{пил})} & \dot{s}_{1,2}^{(i)} & \dot{s}_{2,2}^{(i)} & \dot{s}_{3,2}^{(i)} & \dot{s}_{4,2}^{(i)} & \dot{s}_{5,2}^{(i)} & \dot{s}_{6,2}^{(i)} & \dot{s}_{7,2}^{(i)} & \dot{s}_{8,2}^{(i)} & \dot{s}_{9,2}^{(i)} & \dot{s}_{10,2}^{(i)} & \dot{s}_{11,2}^{(i)} & \dot{a}_{2,2}^{(i,\text{пил})} & \dot{s}_{12,2}^{(i)} & 0 \\ 0 & \dot{s}_{1,3}^{(i)} & \dot{s}_{2,3}^{(i)} & \dot{s}_{3,3}^{(i)} & \dot{s}_{4,3}^{(i)} & \dot{a}_{1,3}^{(i,\text{пил})} & \dot{s}_{5,3}^{(i)} & \dot{s}_{6,3}^{(i)} & \dot{s}_{7,3}^{(i)} & \dot{a}_{2,3}^{(i,\text{пил})} & \dot{s}_{8,3}^{(i)} & \dot{s}_{9,3}^{(i)} & \dot{s}_{10,3}^{(i)} & \dot{s}_{11,3}^{(i)} & \dot{s}_{12,3}^{(i)} & 0 \\ 0 & \dot{s}_{1,4}^{(i)} & \dot{s}_{2,4}^{(i)} & \dot{s}_{3,4}^{(i)} & \dot{s}_{4,4}^{(i)} & \dot{a}_{1,4}^{(i,\text{пил})} & \dot{s}_{5,4}^{(i)} & \dot{s}_{6,4}^{(i)} & \dot{s}_{7,4}^{(i)} & \dot{a}_{2,4}^{(i,\text{пил})} & \dot{s}_{8,4}^{(i)} & \dot{s}_{9,4}^{(i)} & \dot{s}_{10,4}^{(i)} & \dot{s}_{11,4}^{(i)} & \dot{s}_{12,4}^{(i)} & 0 \\ 0 & \dot{a}_{1,5}^{(i,\text{пил})} & \dot{s}_{1,5}^{(i)} & \dot{s}_{2,5}^{(i)} & \dot{s}_{3,5}^{(i)} & \dot{s}_{4,5}^{(i)} & \dot{s}_{5,5}^{(i)} & \dot{s}_{6,5}^{(i)} & \dot{s}_{7,5}^{(i)} & \dot{s}_{8,5}^{(i)} & \dot{s}_{9,5}^{(i)} & \dot{s}_{10,5}^{(i)} & \dot{s}_{11,5}^{(i)} & \dot{a}_{2,5}^{(i,\text{пил})} & \dot{s}_{12,5}^{(i)} & 0 \\ 0 & \dot{a}_{1,6}^{(i,\text{пил})} & \dot{s}_{1,6}^{(i)} & \dot{s}_{2,6}^{(i)} & \dot{s}_{3,6}^{(i)} & \dot{s}_{4,6}^{(i)} & \dot{s}_{5,6}^{(i)} & \dot{s}_{6,6}^{(i)} & \dot{s}_{7,6}^{(i)} & \dot{s}_{8,6}^{(i)} & \dot{s}_{9,6}^{(i)} & \dot{s}_{10,6}^{(i)} & \dot{s}_{11,6}^{(i)} & \dot{a}_{2,6}^{(i,\text{пил})} & \dot{s}_{12,6}^{(i)} & 0 \\ 0 & \dot{s}_{1,7}^{(i)} & \dot{s}_{2,7}^{(i)} & \dot{s}_{3,7}^{(i)} & \dot{s}_{4,7}^{(i)} & \dot{a}_{1,7}^{(i,\text{пил})} & \dot{s}_{5,7}^{(i)} & \dot{s}_{6,7}^{(i)} & \dot{s}_{7,7}^{(i)} & \dot{a}_{2,7}^{(i,\text{пил})} & \dot{s}_{8,7}^{(i)} & \dot{s}_{9,7}^{(i)} & \dot{s}_{10,7}^{(i)} & \dot{s}_{11,7}^{(i)} & \dot{s}_{12,7}^{(i)} & 0 \\ 0 & \dot{s}_{1,8}^{(i)} & \dot{s}_{2,8}^{(i)} & \dot{s}_{3,8}^{(i)} & \dot{s}_{4,8}^{(i)} & \dot{a}_{1,8}^{(i,\text{пил})} & \dot{s}_{5,8}^{(i)} & \dot{s}_{6,8}^{(i)} & \dot{s}_{7,8}^{(i)} & \dot{a}_{2,8}^{(i,\text{пил})} & \dot{s}_{8,8}^{(i)} & \dot{s}_{9,8}^{(i)} & \dot{s}_{10,8}^{(i)} & \dot{s}_{11,8}^{(i)} & \dot{s}_{12,8}^{(i)} & 0 \end{bmatrix}^T, \quad (12)$$

$$A_{[P,L]}^{(1,\text{пил})} = \begin{bmatrix} \dot{a}_{1,1}^{(1,\text{пил})} & 0 \\ 0 & \dot{a}_{2,2}^{(1,\text{пил})} \\ \dot{a}_{1,3}^{(1,\text{пил})} & 0 \\ 0 & \dot{a}_{2,4}^{(1,\text{пил})} \\ \dot{a}_{1,5}^{(1,\text{пил})} & 0 \\ 0 & \dot{a}_{2,6}^{(1,\text{пил})} \\ \dot{a}_{1,7}^{(1,\text{пил})} & 0 \\ 0 & \dot{a}_{2,8}^{(1,\text{пил})} \end{bmatrix}^T, \quad A_{[P,L]}^{(2,\text{пил})} = \begin{bmatrix} 0 & \dot{a}_{2,1}^{(2,\text{пил})} \\ \dot{a}_{1,2}^{(2,\text{пил})} & 0 \\ 0 & \dot{a}_{2,3}^{(2,\text{пил})} \\ \dot{a}_{1,4}^{(2,\text{пил})} & 0 \\ 0 & \dot{a}_{2,5}^{(2,\text{пил})} \\ \dot{a}_{1,6}^{(2,\text{пил})} & 0 \\ 0 & \dot{a}_{2,7}^{(2,\text{пил})} \\ \dot{a}_{1,8}^{(2,\text{пил})} & 0 \end{bmatrix}^T. \quad (13)$$

Будем считать, что канал связи между передатчиком и приемником квазистационарный на протяжении передачи OFDM кадров на интервале наблюдения, т. е. $h_{<K>,l}^{(i,j)} = h_{<K>,l+1}^{(i,j)}$.

Тогда модуляционные символы, наблюдаемые на приемнике, имеют вид

$$\hat{r}_{k,l}^{(j,\alpha)} = \dot{h}_k^{(1,j)} \dot{s}_{k,l}^{(1,\alpha)} + \dot{h}_k^{(2,j)} \dot{s}_{k,l}^{(2,\alpha)} + \hat{\theta}_{k,l}^{(j,\alpha)}, \quad (14)$$

где $\hat{\theta}_{[k,l]}^{(j,\alpha)}$ – значение некоррелированных спектральных коэффициентов аддитивного белого гауссовского шума с нормальным распределением квадратурных составляющих с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ_0^2 .

Рассмотрим статистические свойства амплитуды элементов наблюдаемой комплексной спектрограммы на значащих поднесущих для A принятых кадров, а именно: математическое ожидание $M\left(\left|\hat{r}_{k,l}^{(j)}\right|\right)$ и среднеквадратическое отклонение (СКО) $\sigma\left(\left|\hat{r}_{k,l}^{(j)}\right|\right)$ [4, 5].

Комплексная спектрограмма OFDM кадра состоит из трех типов поднесущих: защитных, множество их номеров обозначим $k_{\text{защ}}$; пилотных $k_{\text{пил}} = k_{1,\text{пил}} \cup k_{2,\text{пил}}$; информационных $k_{\text{инф}}$. На позициях защитных (нулевых) поднесущих передача модуляционных сигналов отсутствует, т. е. $\dot{s}_{k_{\text{защ}},l}^{(1,\alpha)} = \dot{s}_{k_{\text{защ}},l}^{(2,\alpha)} = 0$, а значит математическое ожидание амплитуды принимаемых модуляционных символов на этих поднесущих равно математическому ожиданию амплитуды шума $M\left(\left|\hat{r}_{k_{\text{защ}},l}^{(j)}\right|\right) = M\left(\left|\hat{\theta}_{k_{\text{защ}},l}^{(j,\alpha)}\right|\right)$. Учитывая, что модуль амплитуды шума равен квадратному корню суммы квадратов квадратурных составляющих, а квадратурные составляющие являются независимыми гауссовскими случайными величинами с нулевым математическим ожиданием и одинаковой дисперсией, модуль амплитуды шума также является случайной величиной и имеет распределение Релея.

Функция плотности распределения вероятности Релея имеет вид [3, 5]

$$W_{\text{защ}}(x; \sigma) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right), x \geq 0, \sigma > 0, \quad (15)$$

где $x = \left| \hat{r}_{k_{\text{защ}}, l}^{(j)} \right|$.

Основные статистические параметры амплитуды спектральных коэффициентов на защитных поднесущих составляют:

$$M\left(\left| \hat{r}_{k_{\text{защ}}, l}^{(j)} \right| \right) = M\left(\left| \hat{\theta}_{k_{\text{защ}}, l}^{(j)} \right| \right) = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma_0; \quad (16)$$

$$\sigma\left(\left| \hat{r}_{k_{\text{защ}}, l}^{(j)} \right| \right) = \sigma\left(\left| \hat{\theta}_{k_{\text{защ}}, l}^{(j)} \right| \right) = \sqrt{\frac{4-\pi}{2}} \sigma_0. \quad (17)$$

На позициях пилотных поднесущих от одной антенны $k_{1, \text{пил}}$ излучения от другой антенны отсутствуют $\dot{s}_{k_{1, \text{пил}}, l}^{(2, \alpha)} = 0$, поэтому математическое ожидание амплитуды принятых модуляционных символов $M\left(\left| \hat{r}_{k_{\text{пил}}, l}^{(j)} \right| \right)$ на позициях пилотных поднесущих OFDM кадра имеет вид:

– для пилотных символов от 1-й антенны

$$M\left(\left| \hat{r}_{k_{1, \text{пил}}, l}^{(j)} \right| \right) = M\left(\left| \dot{h}_{k_{1, \text{пил}}, l}^{(1, j)} \dot{s}_{k_{1, \text{пил}}, l}^{(1, \alpha)} + \hat{\theta}_{k_{1, \text{пил}}, l}^{(j, \alpha)} \right| \right); \quad (18)$$

– для пилотных символов от 2-й антенны

$$M\left(\left| \hat{r}_{k_{2, \text{пил}}, l}^{(j)} \right| \right) = M\left(\left| \dot{h}_{k_{2, \text{пил}}, l}^{(2, j)} \dot{s}_{k_{2, \text{пил}}, l}^{(2, \alpha)} + \hat{\theta}_{k_{2, \text{пил}}, l}^{(j, \alpha)} \right| \right). \quad (19)$$

Пилотные символы передаются с использованием фазовой манипуляции, поэтому можно полагать, что $\left| \dot{s}_{k_{1, \text{пил}}, l}^{(1, \alpha)} \right| = \left| \dot{s}_{k_{2, \text{пил}}, l}^{(2, \alpha)} \right| = C_{\text{пил}}$ (где C – константа). Значения амплитуды канальных коэффициентов от 1-й и 2-й антенн к j -й $\left| \dot{h}_k^{(1, j)} \right|$ и $\left| \dot{h}_k^{(2, j)} \right|$ на интервале наблюдения также можно полагать неизменными, т. е. $\tilde{M}\left(\left| \dot{h}_k^{(1, j)} \right| \right) = C_1, \tilde{M}\left(\left| \dot{h}_k^{(2, j)} \right| \right) = C_2$. С учетом сделанных допущений амплитуда принятых модуляционных символов на пилотных поднесущих для разных излучающих антенн имеет обобщенное распределение Рэлея или, как его еще называют, распределение Райса [1, 3]. Функция плотности распределения вероятности Райса имеет вид [7]:

$$W_{\text{пил}}(x | \nu, \sigma_0) = \frac{x}{\sigma_0^2} \exp\left(-\frac{x^2 + \nu^2}{2\sigma_0^2}\right) I_0\left(\frac{x\nu}{\sigma_0^2}\right), \nu \geq 0, \sigma_0 \geq 0; \quad (20)$$

$$\nu = \sqrt{\left(M\left(\text{Re}\left(r_{k_{\text{пил}}, l}^{(j)}\right)\right)\right)^2 + \left(M\left(\text{Im}\left(r_{k_{\text{пил}}, l}^{(j)}\right)\right)\right)^2}, \quad (21)$$

где $x = \left| \hat{r}_{k_{\text{пил}}, l}^{(j)} \right|$, I_0 – модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка.

Основные статистические свойства амплитуды принимаемого сигнала на пилотных поднесущих составляют:

$$M\left(\left| \hat{r}_{k_{\text{пил}}, l}^{(j)} \right| \right) = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma_0 L_{1/2}\left(-\frac{\nu^2}{2\sigma_0^2}\right); \quad (22)$$

$$\sigma\left(\left|\hat{r}_{k_{\text{пил}},l}^{(j)}\right|\right) = \sqrt{2\sigma_0 + v^2 - \frac{\pi\sigma_0^2}{2} L_{1/2}^2 \left(\frac{-v^2}{2\sigma_0^2}\right)}, \quad (23)$$

где $L_{1/2}$ – полином Лагерра.

При достаточно больших значениях отношения сигнал/шум распределение Райса переходит в распределение Гаусса. На практике уже при $\frac{v}{\sigma_0} > 3$ распределение (20) можно полагать нормальным, что соответствует значительной части практически значимых условий приема и демодуляции сигналов OFDM. Поэтому будем полагать, что закон распределения амплитуды модуляционных символов для пилотных поднесущих имеет нормальное распределение с величиной СКО, определяемой шумами, функция плотности распределения вероятности которого имеет вид

$$W_{\text{пил}}(x, \sigma_0) = \frac{1}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\left(x - M\left(\left|\hat{r}_{k_{\text{пил}},l}^{(j)}\right|\right)\right)^2}{2\sigma_0^2}\right), \quad (24)$$

где $x = \left|\hat{r}_{k_{\text{пил}},l}^{(j)}\right|$.

Учитывая, что СКО амплитуды модуляционных символов на пилотных поднесущих определяется только СКО шума, то справедливы следующие отношения:

$$\sigma\left(\left|\hat{r}_{k_{1,\text{пил}},l}^{(j)}\right|\right) = \sigma\left(\left|\hat{r}_{k_{2,\text{пил}},l}^{(j)}\right|\right) = \sigma\left(\left|\hat{r}_{k_{\text{пил}},l}^{(j)}\right|\right); \quad (25)$$

$$\sigma\left(\left|\hat{r}_{k_{\text{защ}},l}^{(j,\alpha)}\right|\right) \leq \sigma\left(\left|\hat{r}_{k_{\text{пил}},l}^{(j,\alpha)}\right|\right) \leq \sigma_0. \quad (26)$$

На позициях информационных поднесущих $k_{\text{инф}}$ амплитуда модуляционных символов представляет собой случайную величину, являющуюся композицией трех случайных величин, тогда математическое ожидание амплитуды модуляционных символов на информационных поднесущих имеет вид

$$M\left(\left|\hat{r}_{k_{\text{инф}},l}^{(j)}\right|\right) = M\left(\left|\dot{h}_{k_{\text{инф}}}^{(1,j)} \hat{s}_{k_{\text{инф}},l}^{(1,\alpha)} + \dot{h}_{k_{\text{инф}}}^{(2,j)} \hat{s}_{k_{\text{инф}},l}^{(2,\alpha)} + \hat{\theta}_{k_{\text{инф}},l}^{(j,\alpha)}\right|\right). \quad (27)$$

Учитывая статистическую независимость канальных коэффициентов, передаваемых модуляционных символов и шума, математическое ожидание и СКО с учетом (14) в общем случае получим:

$$M\left(\left|\hat{r}_{k_{\text{инф}},l}^{(j)}\right|\right) > \left(M\left(\left|\hat{r}_{k_{1,\text{пил}},l}^{(j)}\right|\right); M\left(\left|\hat{r}_{k_{2,\text{пил}},l}^{(j)}\right|\right)\right) > M\left(\left|\hat{r}_{k_{\text{защ}},l}^{(j)}\right|\right); \quad (28)$$

$$\sigma\left(\left|\hat{r}_{k_{\text{инф}},l}^{(j)}\right|\right) > \left(\sigma\left(\left|\hat{r}_{k_{\text{пил}},l}^{(j)}\right|\right) \approx \sigma\left(\left|\hat{r}_{k_{\text{защ}},l}^{(j)}\right|\right)\right). \quad (29)$$

Выражения (28) и (29) являются принципиально важными, потому что они формируют признаковое пространство, которое позволяет сделать вывод о факте применения пространственного кодирования при передаче OFDM сигнала.

Для подтверждения произведенных аналитических выводов и полученных выражений для закона распределения случайной величины и ее основных числовых характеристик распределения была проведена серия статистических испытаний путем имитационного моделиро-

вания передатчика системы ММО в условиях, обеспечивающих различные ОСШ в каналах приема. Результаты численного моделирования представлены на рис. 5, где $q^{(1)}$ и $q^{(2)}$ – значения ОСШ в каналах приема от первой и второй антенны, соответственно.

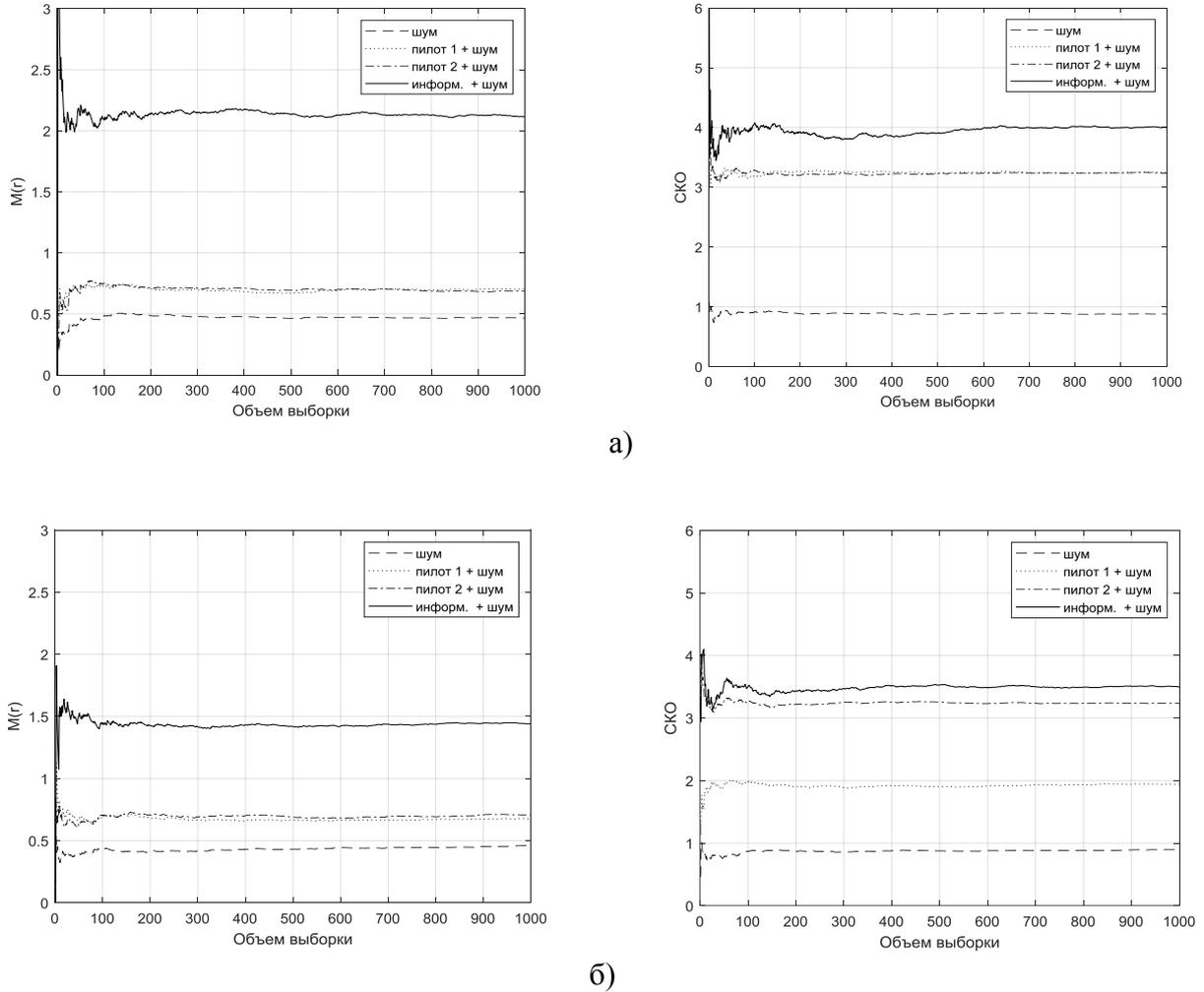


Рис. 5. Оценка математического ожидания и СКО амплитуды принимаемых модуляционных символов в зависимости от размера выборки наблюдения для различных значений ОСШ:

$$а - q^{(1)}=10 \text{ дБ}, q^{(2)}=10 \text{ дБ}; б - q^{(1)}=5 \text{ дБ}, q^{(2)}=10 \text{ дБ}$$

Оценка математического ожидания и СКО модуляционных символов в OFDM слове на интервале наблюдения из A последовательных кадров определяется следующими выражениями:

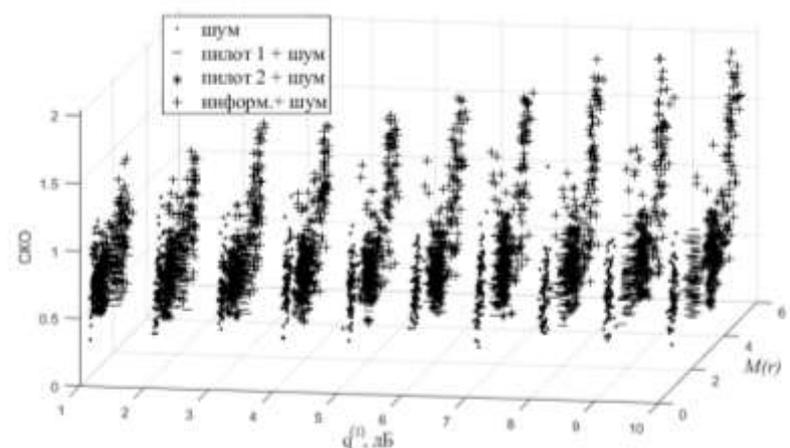
$$\tilde{M}(|\hat{r}_{k,l}^{(j)}|) = \frac{1}{A} \sum_{\alpha=1}^A |\hat{r}_{k,l}^{(j,\alpha)}|; \tag{30}$$

$$\tilde{\sigma}(|\hat{r}_{k,l}^{(j)}|) = \sqrt{\frac{1}{A} \sum_{\alpha=1}^A (|\hat{r}_{k,l}^{(j,\alpha)}| - \tilde{M}(|\hat{r}_{k,l}^{(j,\alpha)}|))^2}. \tag{31}$$

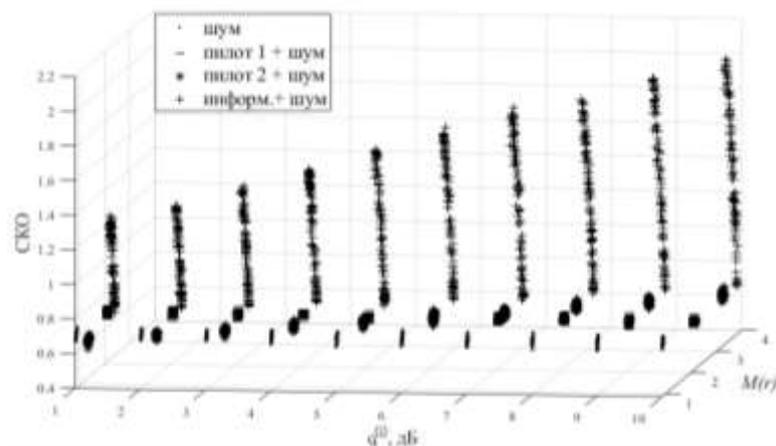
Низкий уровень СКО амплитуды модуляционных символов на пилотных поднесущих для различного ОСШ является информативным признаком для выявления позиций пилотных поднесущих в спектрограмме OFDM кадра. При этом на выявленных позициях

пилотных поднесущих математическое ожидание амплитуды принятых модуляционных символов будет формировать два уровня, т. е. $\tilde{M}\left(\left|r_{k_{1,мпл},l}^{(j)}\right|\right) \neq \tilde{M}\left(\left|r_{k_{2,мпл},l}^{(j)}\right|\right)$, которые соответствуют количеству передающих антенн, что является информативным признаком радиоизлучений средств связи, функционирующих в режиме MIMO – OFDM. Только в случае, когда амплитуды канальных коэффициентов от разных передающих антенн равны между собой, т. е. $\left|\dot{h}_k^{(1,j)}\right| = \left|\dot{h}_k^{(2,j)}\right|$, на пилотных поднесущих наблюдается один уровень, т. е. $\tilde{M}\left(\left|r_{k_{1,мпл},l}^{(j)}\right|\right) \approx \tilde{M}\left(\left|r_{k_{2,мпл},l}^{(j)}\right|\right) \approx \tilde{M}\left(\left|r_{k_{инф},l}^{(j)}\right|\right)$, при этом $\tilde{M}\left(\left|r_{k_{инф},l}^{(j)}\right|\right) \gg \tilde{M}\left(\left|r_{k_{мпл},l}^{(j)}\right|\right)$.

Указанные особенности отдельных спектральных коэффициентов в спектрограмме свидетельствуют о факте применения пространственного кодирования сигналов. Важно, что с увеличением интервала наблюдения дисперсия оценок отношения математического ожидания и СКО амплитуды на различных поднесущих снижается пропорционально его длительности, тем самым увеличивается достоверность определения факта применения пространственного кодирования сигнала. На рис. 6 представлена совокупность статистических оценок зависимости математического ожидания и СКО амплитуды сигнала на защитных, пилотных и информационных поднесущих от отношения сигнал/шум от разных передающих антенн и объема выборки, выраженной в числе наблюдаемых кадров (10, 1000).



а)



б)

Рис. 6. Зависимость оценки математического ожидания и СКО амплитуды спектральных коэффициентов от ОСШ на первой антенне $q^{(1)}$ при фиксированном значении $q^{(2)}=6$ дБ: а – выборка из 10 кадров; б – выборка из 1000 кадров

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для проверки возможности практического применения предложенного информативного признака сигналов OFDM с пространственным кодированием проведен эксперимент, в котором в качестве источника излучения выступил БПЛА «DJI Phantom 4» (рис. 7) функционирующий в режиме MIMO. Данный БПЛА при передаче данных использует OFDM сигнал полосой 9,5 МГц с параметрами:

– длительность кадра	$\approx 0,00976$ с;
– период следования кадров	$\approx 0,014$ с;
– частота дискретизации для обработки	11,2 МГц
– длина слова OFDM	1024 отсчетов;
– число значащих поднесущих частот в сигнале OFDM	846;
– длина префикса OFDM	128 отсчетов
– количество OFDM слов в кадре	95.

В начале каждого кадра первое слово – синхροкомбинация (вид модуляции ФМ-2), второе и третье слово – служебные слова с пилотными поднесущими (для передачи данных и пилотной последовательности использовался вид модуляции ФМ-2), четвертое и последующие слова – данные с пилотными поднесущими (для передачи данных использовался вид модуляции КАМ-64 и пилотной последовательности ФМ-2). Расположение пилотных поднесущих варьируется в пределах кадра, но одинаково от кадра к кадру.

Регистрация сигнала на несущей частоте 2470 МГц осуществлялась цифровым радиоприемным устройством USRP-2900 записью квадратурных целочисленных двухбайтовых отсчетов на интервале 13 с [6, 8].

Для определения положения пилотных поднесущих в каждом слове вычислим СКО амплитуды каждой поднесущей на интервале из 50 кадров. На рис. 8 представлены графики зависимости СКО амплитуды спектральной составляющей от ее номера для служебных и информационных OFDM слов. Номера поднесущих с малыми значениями СКО соответствуют номерам пилотных поднесущих.



Рис. 7. DJI Phantom 4

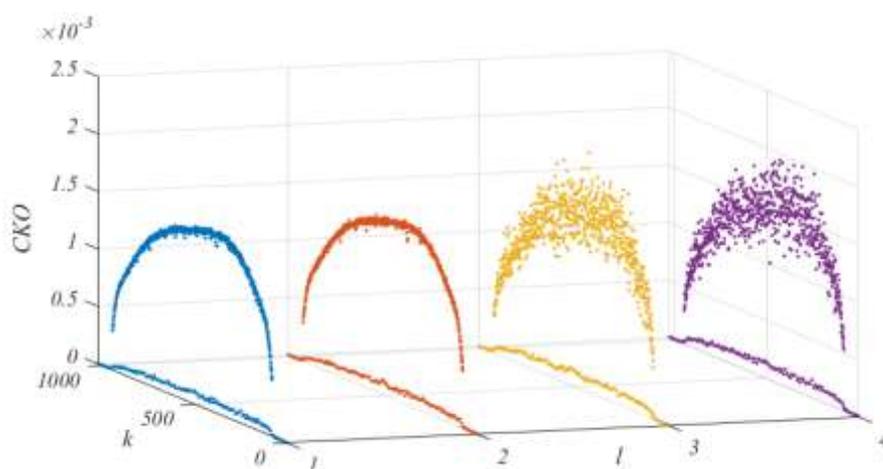


Рис. 8. Оценка среднеквадратического отклонения амплитуд спектральных коэффициентов

Теперь для определения числа антенн в системе пространственного кодирования оценим число уровней, формируемых оценкой математического ожидания. С этой целью для пилотных поднесущих вычислим оценку математического ожидания амплитуд модуляционных символов как выборочное среднее (рис. 9).

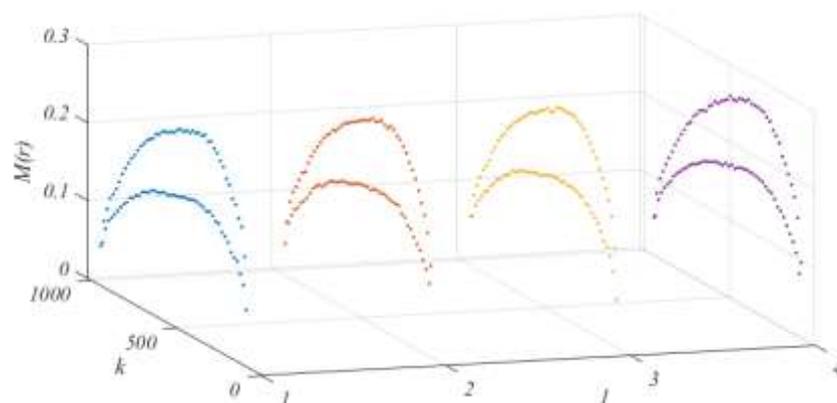


Рис. 9. Оценка математического ожидания амплитуд спектральных коэффициентов

На рис. 9 наблюдается формирование на служебных словах и словах с данными двух уровней математического ожидания. Наличие разных уровней математического ожидания на пилотных поднесущих свидетельствует о факте использования пространственного кодирования при передаче OFDM сигнала.

Результаты эксперимента полностью подтверждают результаты имитационного моделирования и теоретические положения, что, в свою очередь, свидетельствует о достоверности выявленного информативного признака и возможности его применения для выявления радиосигналов с пространственным кодированием.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлены особенности формирования OFDM сигналов, передаваемых с использованием пространственно-временного и пространственно-частотного кодирования, в системах связи и передачи данных. Предложен информативный признак для выявления факта применения пространственного кодирования при передаче сигналов OFDM, основанный на определении и оценивании значений пилотных поднесущих OFDM сигнала. Достоверность информативного признака и возможность его применения на практике подтверждена в ходе экспериментальных исследований. Таким образом, цель исследования, заключающаяся в разработке информативного признака для обнаружения факта применения пространственного кодирования OFDM сигналов, достигнута.

Полученные результаты могут быть использованы для ситуационной адаптации параметров и режимов функционирования средств связи с учетом складывающейся радиоэлектронной обстановки.

В условиях априорной неопределенности параметров сигналообразования, внедрение в современные средства обнаружения БПЛА возможности распознавания фактов применения пространственного кодирования OFDM сигналов позволит повысить корректность обработки принимаемых сигналов и правильность распознавания режимов работы БПЛА.

Список используемых источников

1. Пространственная обработка сигналов в MIMO-системах сотовой связи : учеб. пособие / В. Т. Ермолаев [и др.]. – Н. Новгород : Нижегородский госуниверситет, 2020. – 134 с.
2. Рашич А. В. Сети беспроводного доступа WiMAX. – СПб. : Изд-во Политехнического университета, 2011. – 180 с.

3. *Ермолаев В. Т., Маврычев Е. А., Флакман А. Г.* Современные методы обработки сигналов в беспроводных системах : учеб. пособие. – Н. Новгород : НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2011. – 140 с.
4. Статистические методы обработки результатов наблюдений / Р. М. Юсупов [и др.]; под ред. Р. М. Юсупова. – М. : МО СССР, 1984. – 786 с.
5. *Венцель Е. С.* Теория вероятности. – 10-е изд. – М. : Высшая школа, 2006. – 575 с.
6. *Веселов И. Д., Житков И. В., Неретина К. А.* Особенности формирования и оценивание параметров OFDM сигналов в системах MIMO // Сборник трудов XXX Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». – Воронеж : Издательский дом ВГУ, 2024. – Т. 3. – С. 168–175.
7. *Пукса А. О., Шевченко А. А.* Перспективы развития и проблемы OFDM технологии // World science : problems and innovations : сб. ст. победителей IX Международной науч.-практ. конф. – Пенза: МЦНС «Наука и просвещение», 2017. – С. 99–101.
8. Методика оценивания параметров сигналов с OFDM-модуляцией / С. С. Старицин [и др.] // Журнал радиоэлектроники. – 2020. – № 6. – URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jun20/12/text.pdf> (дата обращения: 23.04.2024). – DOI 10.30898/1684-1719.2020.6.12.
9. *Fazel K., Kaiser S.* Multi-carrier and spread spectrum systems: from OFDM and MC-CDMA to LTE and WiMAX. – 2nd ed. – United Kingdom : John Wiley & Sons, Ltd, 2008. – 360 p.

А. Н. Григорьев,
доктор технических наук, доцент;
Д. Н. Комраков,
кандидат технических наук;
Д. С. Коршунов,
кандидат технических наук;
В. М. Лизан

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ ПРОЕКТИРУЕМОЙ АВИАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ НА ОСНОВЕ ОЦЕНИВАНИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СОВМЕСТНОЙ МНОГОМАРШРУТНОЙ СЪЕМКИ

На основе опыта аналитического моделирования авиационных систем наблюдения в интересах оценивания потенциальной результативности целевого функционирования воздушного судна доработано математическое описание, позволяющее частично снять принятые в существующих исследованиях допущения и ограничения. Выполненная формализация описания авиационной системы наблюдения позволяет учесть вариабельность числа воздушных судов, функционирующих в режиме совместной многомаршрутной съемки удаленного крупномасштабного площадного объекта, и влияние ветра на их движение по заданной траектории. Предложенная математическая модель реализуется с использованием аналитического метода, что в первом приближении позволяет доступным образом оценивать влияние условий и параметров съемки на производительность функционирования системы наблюдения. На примере группы условно-реальных воздушных судов выполнен вычислительный эксперимент, представлены и интерпретированы его результаты. Исследования, выполненные на разработанной модели, выявили существование условий оптимальной производительности авиационной системы наблюдения, оцениваемой количеством отснятой площади при заданной удаленности объекта.

Ключевые слова: производительность авиационной системы наблюдения, воздушное судно, оптико-электронный комплекс, совместная многомаршрутная съемка, площадной объект съемки.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных современных методов сбора пространственных данных, обеспечивающих решение прикладных задач в области исследования земной поверхности, является съемка с использованием авиационных систем. В отдельных задачах, таких как мониторинг состояния сельскохозяйственных угодий и природных ресурсов, мониторинг районов чрезвычайных ситуаций и аварий, инженерные изыскания и т. д., съемочный участок является крупномасштабным площадным объектом, и требуется проведение многомаршрутной съемки его территории. В основном аэросъемка осуществляется с использованием специализированных оптико-электронных комплексов (ОЭК), размещенных на борту воздушных судов (ВС). Такие ВС могут представлять собой как пилотируемые, так и автономные летательные аппараты.

Несмотря на активное развитие альтернативного метода получения пространственных данных с использованием космических систем дистанционного зондирования, обладающих высокой производительностью, технологии аэросъемки остаются не только востребованными, но и демонстрируют положительную динамику развития. Это объясняется экономическими показателями выполнения съемочных работ и более гибкими временными ограничениями. При этом производительность авиационной системы наблюдения для съемки крупномасштабного площадного объекта может наращиваться за счет оптимизации компоновки ОЭК или путем использования группы ВС, представленных летательными аппаратами самолетного типа и реализующих режим совместной многомаршрутной съемки. При использовании такого режима подразумевается, что для съемки одного участка задействуется несколько ВС, функционирующих по согласованным полетным заданиям. В результате реше-

ния задачи наблюдения должен формироваться набор оптико-электронных снимков, которые удовлетворяют требованиям в отношении изобразительных свойств и фотограмметрического качества, и сопутствующей служебной информации [1, 2].

Традиционное методическое обеспечение аэросъемочных работ достаточно подробно изучено в литературе [1–3]. В ряде работ [4–6] проведены исследования по оцениванию потенциальной производительности отдельного ВС в задаче съемки удаленного участка, что позволило учесть потери времени, обусловленные совершением перелета и последовательных заходов на маршруты с выполнением заданных требований. В статье [7] предложена методика выбора оптимальной компоновки ОЭК на борту ВС, которая обеспечивает максимизацию производительности многомаршрутной съемки удаленного участка в конкретных условиях.

В свою очередь, в существующих исследованиях [4–7] не проработан вопрос использования группы ВС, составляющих совместно с наземными средствами авиационную систему наблюдения, для съемки крупномасштабного площадного объекта. Отсутствует математический аппарат, позволяющий в первом приближении получить оценку производительности системы в режиме совместной многомаршрутной съемки. Использование такого аппарата позволило бы, исходя из заданных требований, обоснованно выбрать число ВС и параметры съемки, т. е. решить задачу проектирования авиационной системы наблюдения, функционирующей в режиме совместной многомаршрутной съемки.

Кроме того, существующие математические модели многомаршрутной съемки сформулированы при значительном ограничении на внешние условия функционирования ВС [4–7], а именно – не учтено влияние ветра на полет летательного аппарата. В общем случае ветер вызывает снос летательного аппарата самолетного типа – отклонение траектории движения в горизонтальной плоскости от курсового направления относительно земной поверхности. На преодоление такого воздействия для удержания полета по заданной траектории затрачивается определенный лётный ресурс, что приводит к сокращению продолжительности полета и съемочного времени. Задачи оценивания влияния ветра на параметры полета автономного ВС рассмотрены, в частности, в работе [8]. При этом существующие наработки не позволяют непосредственно учесть влияние ветра на производительность съемки.

Таким образом, направление исследований по обоснованию выбора структуры и параметров авиационной системы наблюдения, которая представлена группой ВС, функционирующих в условиях воздействия ветра, является актуальным. Цель исследования состоит в повышении производительности съемки удаленных участков, в том числе представленных крупномасштабными площадными объектами. Для достижения цели предполагается решение задач по формализации описания авиационной системы наблюдения, разработке модели многомаршрутной съемки участка, обеспечивающей оценивание производительности съемки, экспериментальному исследованию для подтверждения возможности обоснования выбора структуры и параметров системы на примере условно-реальных ВС с ОЭК.

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ОПИСАНИЯ АВИАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ

В общем случае модель авиационной системы наблюдения предлагается представить в виде функциональной зависимости, связывающей входные и выходные переменные модели через множество ее параметров (рис. 1):

$$Y = f(X, X', S), \quad (1)$$

где X – вектор контролируемых входных переменных, $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$;

X' – вектор неконтролируемых входных переменных, $X' = [x'_1, x'_2, \dots, x'_p]$;

Y – вектор выходных переменных, $Y = [y_1, y_2, \dots, y_m]$;

S – вектор внутренних параметров, $S = [s_1, s_2, \dots, s_k]$.

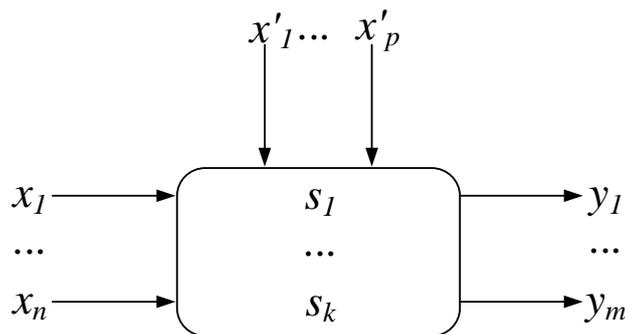


Рис. 1. Формализованное описание аэросъемочной системы наблюдения

Входные переменные разделяются на две составляющие, включающие контролируемые и неконтролируемые переменные. Под контролируемыми входными переменными в работе понимаются показатели, которыми можно управлять для выполнения цикла съемки с требуемым качеством. Такими переменными могут быть, например, количество ВС, конфигурация съемочного участка и т. п. В качестве неконтролируемых (возмущающих) входных переменных выступают показатели, значения которых в общем случае определяются внешней средой и условиями решения задачи наблюдения и не доступны для управления (например, удаленность съемочного участка, скорость и направление установившегося ветра). Внутренние параметры системы характеризуют устойчивые свойства системы, например параметры ОЭК, летные возможности ВС. Выходные параметры характеризуют результат работы системы, в частности ее производительность.

Описываемое ВС с ОЭК, входящее в состав авиационной системы наблюдения, представляет собой летательный аппарат, выполненный по самолетной схеме и оснащенный силовой установкой. Судно выполняет функцию по перемещению ОЭК в воздушном пространстве непосредственно к участку и над участком съемки. Модель системы содержит следующие параметры: N^{av} – количество ВС в аэросъемочной системе; V – крейсерская скорость полета ВС; H^{av} – высоту полета; t_g – максимальную продолжительность полета; D – дальность полета; β_{max} – максимальный угол крена при выполнении разворота; V_r – скорость полета при выполнении разворота. В качестве скорости V^{av} рассматривается крейсерская скорость V .

Используемый ОЭК представляет собой цифровой кадровый фотоаппарат, размещенный на борту ВС и выполняющий функцию сбора данных о подстилающей поверхности. Описание ОЭК содержит ряд параметров: a_p – размер светочувствительной ячейки фотоприемного устройства (ФПУ); a_x, a_y – размеры светочувствительной области ФПУ; f – фокусное расстояние объектива.

В отношении модели аэросъемочной системы наблюдения принимаются следующие упрощения. Исследуется полет группы ВС с учетом воздействия ветра, которое описывается горизонтальной составляющей скорости W и углом ветра ϵ , определяющего его направление. Взлет и посадка группы ВС осуществляется в одном пункте. В ходе одного цикла функционирования группы ВС (цикла съемки) последовательно выполняются взлет, перелет до участка, совместная многомаршрутная съемка участка, обратный перелет и посадка группы ВС. При съемке удаленного участка не учитывается неравномерность скорости полета группы ВС. Предполагается, что съемка выполняется строго в надир. При многомаршрутной съемке участка полет выполняется по прямолинейным параллельным маршрутам с номинальными параметрами съемки. Требования к фотограмметрическому качеству регистрируемых снимков задаются величинами продольного и поперечного перекрытий.

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МНОГОМАРШРУТНОЙ СЪЕМКИ УЧАСТКА ГРУППОЙ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

По значениям параметров ВС с ОЭК для условий плановой кадровой съемки оцениваются длина стороны снимка на местности вдоль маршрута l_x , продольный B_x базис съемки (рис. 2) [2, 5]:

$$l_x = a_x \frac{H^{av}}{f}, \quad B_x = l_x \cdot \left(\frac{100 - p_x}{100} \right). \quad (2)$$

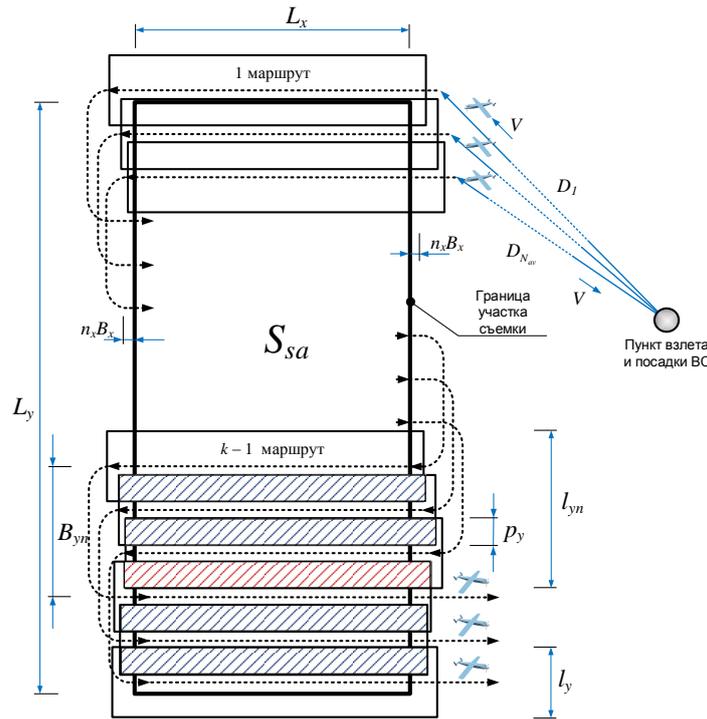


Рис. 2. Схема и параметры выполнения совместной многомаршрутной съемки удаленного участка

При условии наблюдения участка с использованием аэросъемочной системы из группы ВС, формирующих на одном маршруте совместную полосу захвата l_{yn} и общий поперечный базис съемки B_{yn} , имеются зависимости (рис. 2):

$$l_{yn} = \frac{a_y \cdot H^{av}}{f} + \left[(N^{av} - 1) \cdot \frac{a_y \cdot H^{av}}{f} \cdot \left(\frac{100 - p_y}{100} \right) \right]; \quad B_{yn} = l_{yn} - \frac{a_y \cdot H^{av}}{f} \cdot \left(\frac{100 - p_y}{100} \right). \quad (3)$$

Количественная оценка влияния горизонтальной составляющей ветра на полет ВС, представленная вектором путевой скорости ВС \vec{V}_w^{av} , определяется суммой векторов вида [8]

$$\vec{V}_w^{av} = \vec{V}^{av} + \vec{W}, \quad (4)$$

где \vec{V}^{av} – вектор скорости ВС относительно воздушной массы;
 \vec{W} – вектор скорости ветра.

При определенной ориентации векторов \vec{V}^{av} и \vec{W} в условиях принятых допущений значение путевой скорости ВС V_w^{av} вычисляется по следующей формуле [8] (рис. 3):

$$V_w^{av} = V^{av} \cos \psi \pm W \sin \varepsilon, \sin \psi = \frac{W}{V^{av}} \sin \varepsilon, \quad (5)$$

где V^{av} – значение воздушной скорости ВС;
 W – скорость ветра;
 ψ – угол сноса;
 ε – угол, определяющий направление ветра.

В формуле (5) при попутном ветре необходимо использовать знак «плюс», при встречном ветре – знак «минус».

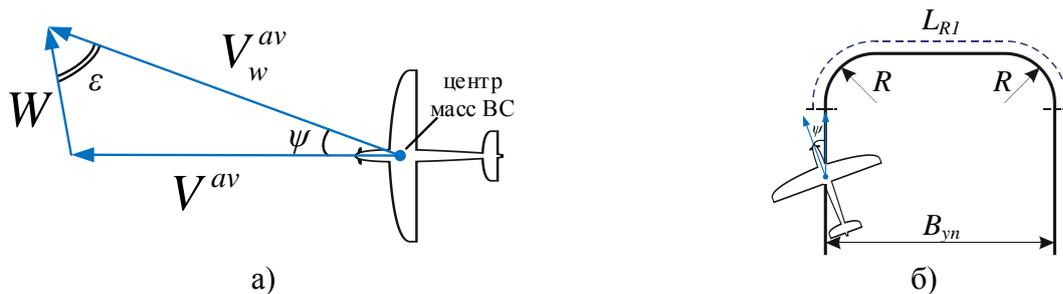


Рис. 3. К расчету параметров многомаршрутной съемки:
 а – связь векторов скорости ВС и горизонтальной составляющей ветра;
 б – к расчету расстояния, проходимого ВС во время разворота

Смена галса в процессе полета, а соответственно и заход на следующий маршрут, производится путем разворота ВС, который в зависимости от параметров съемки и летных возможностей ВС может выполняться одним из известных способов [5]. Для выбора способа захода на следующий маршрут при съемке участка группой ВС сравниваются межмаршрутное расстояние (поперечный базис съемки B_{yn}) и минимальный радиус разворота отдельного ВС (рис. 3,б):

$$R_{\min} = \left(\frac{V_r^2}{\text{tg} \beta_{\max} \cdot 9,81} \right). \quad (6)$$

В рамках исследования рассматриваются три способа захода на следующий маршрут, представленных в работе [7]. Каждый способ характеризуется формализованным критерием выбора и продолжительностью выполнения разворота по времени t_c . На основе результата проверки выполнения критериев [7] в работе выбран способ захода на следующий маршрут путем захода двумя последовательными разворотами на 90° .

Для расчета времени, затрачиваемого ВС на совершение захода на следующий маршрут, необходимо определить расстояние, проходимое им во время разворота:

$$L_{R_1} = \pi R_{\min} + (B_{yn} - 2R_{\min}). \quad (7)$$

По расстоянию L_{R_1} и скорости полета ВС при заходе определяется время, затрачиваемое на выполнение разворота:

$$t_{c1} = \frac{L_{R_1}}{V_r}. \quad (8)$$

Тогда с учетом принятых допущений продолжительность времени t_s , имеющегося для выполнения съемки участка, его площадь S_{sa} и удлинение l_{sa}^{av} предлагается рассчитывать по формулам:

$$t_s = t_g - (t_o^+ + t_o^-) - k' t_{c1}; t_o^+ = \frac{D}{V_w^{av}}; t_o^- = \frac{D}{V_w^{av}}; S_{sa} = L_x \cdot L_y; l_{sa}^{av} = \max[L_x, L_y] / \min[L_x, L_y], \quad (9)$$

где t_o^+, t_o^- – продолжительность полета группы ВС без выполнения съемки – время, затрачиваемое на вылет из пункта размещения до участка и возвращение в пункт размещения ВС;

D – расстояние от пункта размещения группы ВС до центра участка;

L_x – длина стороны участка, ориентированной вдоль маршрутов съемки;

L_y – длина стороны участка, ориентированной поперек маршрутов съемки;

$\max[.]$ и $\min[.]$ – операторы выбора максимального и минимального значения длины стороны участка соответственно.

Частное требование к обеспечению фотограмметрического качества получаемых снимков выполняется таким образом, чтобы в начале и конце маршрута за границами объекта располагалось заданное число продольных базисов n_x . В силу этого длина L_x в случае ведения многомаршрутной съемки (см. рис. 3,а) с учетом влияния ветра вычисляется по следующей формуле:

$$L_x = \frac{(V_w^{av} + V_w^{av}) t_s}{2k'} - 2n_x B_x, \quad (10)$$

где k' – число полных маршрутов съемки.

В свою очередь, ширина L_y в случае ведения совместной многомаршрутной съемки группой ВС с учетом требования к обеспечению фотограмметрического качества при определении размещения краевых маршрутов предлагается определять по формуле

$$L_y = l_{yn} + B_{yn} \cdot (k' - 3). \quad (11)$$

На основе формул (8)–(11) по аналогии с существующими исследованиями [4–7] формируется система уравнений, путем преобразования которой выводится результирующее квадратное уравнение относительно переменной, в качестве которой выступает число маршрутов съемки k :

$$6l_{sa}^{av} B_{yn} (k)^2 + (4B_x n_x + 2l_{sa}^{av} l_{yn} + (V_w^{av} + V_w^{av}) t_{c1} - 6l_{sa}^{av} B_{yn}) k - (V_w^{av} + V_w^{av}) (t_g - (t_o^+ + t_o^-)) = 0. \quad (12)$$

Положительный по значению корень уравнения (12) при заданных параметрах ведения многомаршрутной съемки l_{yn} , B_{yn} , V_w^{av} , t_s и удлинении объекта l_{sa}^{av} рассчитывается по следующей формуле:

$$k = \frac{6l_{sa}^{av} B_{yn} - 4B_x n_x - 2l_{sa}^{av} l_{yn} - (V_w^{av} + V_w^{av}) t_{c1}}{4l_{sa}^{av} B_{yn}} + \sqrt{\frac{(4B_x n_x + 2l_{sa}^{av} l_{yn} + (V_w^{av} + V_w^{av}) t_{c1} - 6l_{sa}^{av} B_{yn})^2 + 8l_{sa}^{av} B_{yn} (V_w^{av} + V_w^{av}) (t_g - (t_o^+ + t_o^-))}{4l_{sa}^{av} B_{yn}}}. \quad (13)$$

Искомое значение потенциально реализуемого числа полных маршрутов k' определяется следующим образом:

$$k' = \lfloor k \rfloor, \quad (14)$$

где $\lfloor \cdot \rfloor$ – оператор округления к меньшему целому значению.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ОЦЕНИВАНИЮ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ АЭРОСЪЕМОЧНОЙ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ

С целью получения оценок потенциальной производительности совместной многомаршрутной съемки предлагается использовать разработанный математический аппарат на примере участка – площадного объекта съемки и группы условно-реальных ВС с ОЭК, характеризующихся вариантами значений параметров:

$$N^{av} = 3/4/5; V^{av} = 120 \text{ км/ч}; V_r = 100 \text{ км/ч}; W = 20 \text{ м/с}; \varepsilon = 0^\circ/15^\circ/30^\circ/45^\circ/60^\circ/75^\circ/90^\circ;$$

$$t_g = 7 \text{ ч}; \beta_{\max} = 15^\circ; a_p = 6,2 \text{ мкм}; a_x \times a_y = 36 \times 24 \text{ мм};$$

$$f = 50 \text{ мм}; p_x = 60\%; p_y = 30\%; D = 100/150/200 \text{ км}; l_{sa}^{av} = 1/2/3/4/5/6.$$

Пусть потенциальная производительность системы характеризуется площадью S_{sa} , которую группа ВС может без пропусков покрыть маршрутами съемки с учетом конкретных параметров ВС с ОЭК и пространственных условий и требований съемки участка. По формуле (3) рассчитывается базис совместной съемки B_{yn} для заданного количества ВС. По известным значениям скорости ветра W , крейсерской скорости V^{av} ВС и угла ветра ε на основе формулы (5) рассчитывается путевая скорость V_w^{av} ВС. С использованием (9) рассчитывается продолжительность съемочного времени t_s с учетом воздействия ветра. На основе формул (5), (7)–(11), (13), (14), в зависимости от удлинения участка, направления и скорости ветра, предлагается определить размеры L_x , L_y и площадь участка местности S_{sa} , который можно покрыть маршрутами съемки в заданных условиях.

Полученные в рамках работы результаты позволяют исследовать возможности авиационной системы при съемке удаленного участка с учетом воздействия установившегося ветра. Частные результаты такого исследования, которые демонстрируют различие потенциальной производительности системы без учета и с учетом влияния горизонтальной составляющей ветра, представлены на рис. 4.

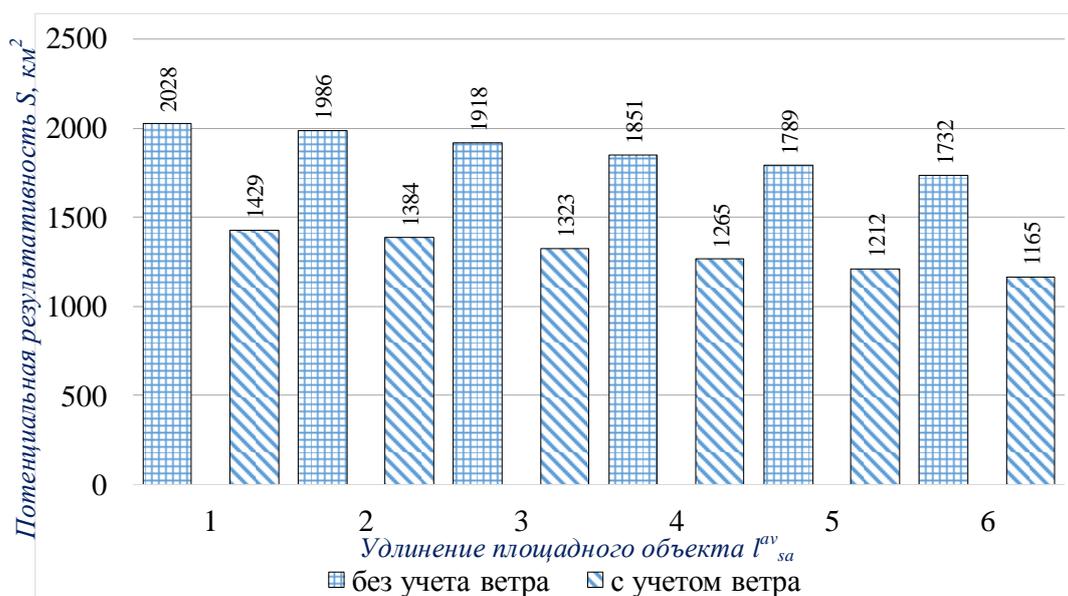


Рис. 4. Результаты расчетов потенциальной производительности при заданных условиях совместной многомаршрутной съемки

В качестве варьируемого параметра используется удлинение участка l_{sa}^{av} . В свою очередь, результаты расчетов для всех предложенных вариантов исходных данных представлены в табл. 1. В эксперименте варьируемыми параметрами выбраны: дальность полета до участка D , количество ВС в авиационной системе наблюдения N^{av} , угол ветра ε и удлинение площадного объекта l_{sa}^{av} .

Таблица 1

Результаты расчетов показателя производительности S_{sa} с учетом влияния ветра

Дальность полета ВС D , км	Угол ветра ε , °	Количество ВС N^{av}	Удлинение съёмочного участка l_{sa}^{av}					
			1	2	3	4	5	6
100	0°	3	1231	1243	1231	1215	1197	1179
		4	1683	1678	1647	1612	1578	1545
		5	2107	2082	2028	1973	1921	1872
	30°	3	1158	1166	1153	1136	1118	1100
		4	1579	1571	1538	1503	1468	1436
		5	1974	1944	1890	1834	1782	1734
	90°	3	368	366	356	345	335	325
		4	485	472	451	432	413	397
		5	587	562	530	502	476	453
150	0°	3	1007	1017	1007	992	976	960
		4	1371	1367	1339	1308	1278	1249
		5	1710	1688	1641	1593	1547	1504
	30°	3	897	904	893	878	863	847
		4	1217	1210	1182	1152	1122	1095
		5	1515	1489	1443	1396	1352	1311
	75°	3	47	47	44	42	39	37
		4	54	51	47	43	40	37
		5	58	53	47	42	38	35
	90°	3	*	*	*	*	*	*
		5	*	*	*	*	*	*
		6	*	*	*	*	*	*
200	0°	3	786	795	786	773	759	745
		4	1064	1061	1037	1011	985	960
		5	1322	1303	1263	1221	1182	1146
	30°	3	642	648	639	626	614	601
		4	865	859	836	811	788	766
		5	1068	1048	1010	973	938	905
	75°	3	*	*	*	*	*	*
		5	*	*	*	*	*	*
		6	*	*	*	*	*	*
	90°	3	*	*	*	*	*	*
		5	*	*	*	*	*	*
		6	*	*	*	*	*	*

Примечание. Символом «*» обозначены невыполнимые циклы совместной многомаршрутной съемки.

Частные результаты оценки потенциальной производительности показывают наличие существенных различий в значениях выбранного показателя S_{sa} при изменении условий съемки, подтверждая тем самым необходимость учета воздействия ветра. Учет потерь

времени, возникающих из-за влияния ветра с определенным направлением относительно движения ВС, позволяет повысить качество оценки потенциальной производительности системы. В представленном примере максимальная производительность достигается при удлинении участка $l_{sa}^{av} = 1$ и при использовании шести ВС – площадь съемки земной поверхности составляет $S_{sa} = 2028 \text{ км}^2$. При этом в условиях воздействия бокового ветра с углом $75^\circ/90^\circ$ при дальности до участка 150/200 км выполнение цикла съемки не представляется возможным.

В отдельно взятых вариантах исходных данных максимум производительности наблюдается при использовании системы из трех ВС и удлинении участка $l_{sa}^{av} = 2$. Также наглядно демонстрируется уменьшение производительности, которую может обеспечить авиационная система, при ухудшении условий съемки: увеличении расстояния от пункта взлета/посадки до центра участка, направления и скорости ветра.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная модель совместной многомаршрутной съемки удаленного участка позволяет с использованием аналитического метода получить оценку производительности авиационной системы. Новизна модели состоит в описании авиационной системы наблюдения, включающей группу ВС, и воздействия ветра на полет ВС, что повышает полноту учета внешних факторов выполнения съемки. Содержание модели позволяет выполнять вычислительные эксперименты по оцениванию производительности при заданных вариантах исходных данных. Таким образом, задачи исследования решены. Использование предложенной модели позволяет определить параметры съемки, при которых обеспечивается максимизация производительности системы наблюдения, что свидетельствует о достижении цели работы.

В силу полученных результатов обеспечивается решение задачи проектирования авиационной системы наблюдения. На основе задания на съемку удаленного участка и получаемых для соответствующих условий оценок производительности обосновывается состав (численность) привлекаемых ВС. В случае съемки крупномасштабного площадного объекта при имеющемся прогнозе метеоусловий, включающем параметры ветра, можно выбрать конфигурацию (удлинение) и ориентацию участка совместной многомаршрутной съемки, при которых обеспечивается максимальная производительность авиационной системы.

Список используемых источников

1. Аэрофотосъемочные работы : справочник аэрофотосъемщика / А. А. Попов [и др.]. – М. : Транспорт, 1984. – 200 с.
2. Руководство по аэросъемочным работам / Ю. И. Полетаев [и др.]. – М. : Воздушный транспорт, 1988. – 336 с.
3. Фотограмметрия и дистанционное зондирование территорий : метод. пособие / Р. А. Кузюбердина [и др.]. – Пермь : Пермская ГСХА, 2009. – 38 с.
4. Частные показатели эффективности применения беспилотных летательных аппаратов при ведении аэросъемочных работ / А. Н. Григорьев [и др.] // Материалы Всероссийской научно-практической конференции (Иркутск, 22–23 мая 2018 г.). – Иркутск : Изд-во Института географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, 2018. – С. 55–59.
5. Подход к оцениванию возможностей многомаршрутной съемки объекта мониторинга с учетом потерь времени при использовании воздушного средства / А. Н. Григорьев [и др.] // Сборник материалов VI Всероссийской ВНК «Проблемы военно-прикладной

геофизики и контроля состояния природной среды». – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2020. – С. 310–315.

6. Подходы к анализу и синтезу беспилотной авиационной системы в задаче исследования аэрофотосъемки площадного объекта / А. Н. Григорьев [и др.] // Научные технологии. – 2021. – Т. 22, № 3. – С. 78–88.

7. Методика выбора оптимальной компоновки оптико-электронного бортового комплекса в задаче воздушного мониторинга площадного объекта / А. Н. Григорьев [и др.] // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2020. – Вып. 659. – С. 276–286.

8. *Моисеев В. С.* Основы теории эффективного применения беспилотных летательных аппаратов : моногр. – Казань : Редакционно-издательский центр «Школа», 2015. – 444 с. – (Сер. : Современная прикладная математика и информатика).

Д. Н. Бирюков,
доктор технических наук, профессор;
А. С. Дудкин,
кандидат технических наук;
Е. С. Родионов

ПОДХОД К СОЗДАНИЮ КРИПТОЗАЩИЩЕННОЙ MESH-СЕТИ

Рассмотрен подход к организации Mesh-сети и передачи информации, основанный на применении технологии пакетной коммутации согласно конфигурируемому протоколу физического уровня LoRa между несколькими устройствами. Спроектирована печатная плата антенны и проанализированы амплитудно-частотные характеристики широкополосного антенно-фидерного устройства. Спроектирована и разработана система, решающая задачу организации децентрализованной защищенной сети с применением алгоритма шифрования AES-256. Выдвинуты предложения по автоматизации передачи данных в центры обработки данных.

Ключевые слова: Mesh-сеть, LoRa, алгоритм шифрования, защита информации, защищенный канал связи.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для организации передачи информации существует множество сетевых технологий и программно-аппаратных средств, основанных на различных типах радиосвязи [1]. Указанные технологии обладают как преимуществами, так и рядом недостатков. К примеру, устройства спутниковой связи, имея огромное преимущество по передаче информации между абонентами с любой точки планеты, характеризуются высокой стоимостью и отсутствием большого количества пользователей с таким оборудованием. Устройства сотовой или мобильной связи являются легкодоступными, однако имеют ограничения по дальности распространения сигнала, накладываемые оператором связи.

Пользователи мобильной и сотовой связи из-за техногенных катастроф или природных катаклизмов могут столкнуться с отключением электроэнергии на обширном участке местности и лишиться подобного типа коммуникации. К примеру, так происходило в Японии 11 марта 2011 года, когда в акватории Тихого океана было зафиксировано землетрясение магнитудой до 9,1 баллов. В результате катастрофы была нарушена система энергоснабжения и десятки тысяч людей остались без связи.

Одним из возможных решений проблемы обеспечения экстренной радиосвязи в экстремальных условиях может быть разработка и внедрение Mesh-сетей [2], позволяющих организовать абонентов сети в распределенную систему ретрансляторов для увеличения площади покрытия. Схематически Mesh-сеть может быть изображена в виде графа (рис.1), в котором каждый пользователь сети является частью децентрализованной системы передачи данных.

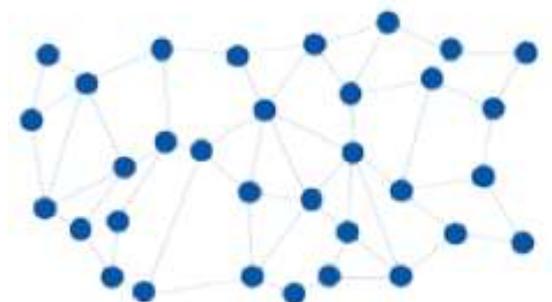


Рис.1. Граф построения Mesh-сети

СПОСОБЫ РЕАЛИЗАЦИИ MESH-СЕТИ И ОСОБЕННОСТИ ЕЕ ВНЕДРЕНИЯ В НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТАХ

В качестве основы для реализации Mesh-сети можно применить наиболее распространенные технологии беспроводной передачи данных (БПД): Bluetooth, Wi-Fi, Zigbee, LoRa. Каждая из них обладает своими преимуществами и недостатками, проявляющимися при их применении в различных сферах деятельности. В условиях природных и/или техногенных катастроф для гарантированной максимально быстрой передачи срочных коротких текстовых сообщений (до 300 символов) наиболее эффективной будет та система связи, которая, обладая устойчивой и самоорганизующейся архитектурой сети, сможет передавать эти сообщения на максимальную дистанцию при минимальных затратах энергии.

Особенно важными требованиями к подобным системам являются требования высокой проникающей способности и помехоустойчивости радиосигнала.

Сравнительные характеристики средств беспроводной связи различных стандартов приведены в табл.1. Из нее следует, что наиболее эффективным является LoRa (стандарт IEEE SA-P1451.5.5), так как дальность передачи данных и помехоустойчивость сравнительно выше, чем у остальных видов. Это связано с использованием помехозащищенного алгоритма кодирования (код Баркера) и особенностью модуляции и демодуляции сигнала. Стоит заметить, что абонентские устройства LoRa имеют самый низкий показатель **энергопотребления**, вследствие чего для узловых датчиков Mesh-сети, созданных на основе этой технологии, предопределяется срок службы, больший по отношению к срокам службы аналогичных узлов, использующих иные технологии.

Таблица 1

Характеристики абонентских устройств беспроводной радиосвязи

№ п/п	Параметр	Bluetooth	Wi-Fi	Zigbee	LoRa	
1	Частота, ГГц	2.4	2.4, 5	0.85–0.93, 2.4	0.433, 0.868, 0.915	
3	Скорость передачи данных, бит/с	$3 * 10^6$	$100 * 10^6$	$250 * 10^3$	$50 * 10^3$	
4	Дальность, м	В условиях городской застройки	20	50	200	1000
		В условиях сельской местности	100	200	400	10000
5	Площадь, покрываемая радиосигналом одного устройства, м ²	В условиях городской застройки	1256	7850	$1,256 * 10^5$	$3,14 * 10^6$
		В условиях сельской местности	$3,14 * 10^4$	$1,256 * 10^5$	$5,024 * 10^5$	$3,14 * 10^{10}$
6	Энергопотребление, мА/ч	31,1	300	50	10	
7	Помехоустойчивость	Низкая	Низкая	Низкая	Высокая	
8	Средняя рыночная цена устройства	1200	3000	2500	4500	

Также стандартные устройства с модулями LoRa характеризуются низким энергопотреблением. Особенностью протокола LoRa является применение энергосберегающих алгоритмов [3], которые позволяют обеспечить низкое энергопотребление в передающем и в спящем режимах работы (10 мА и 100 мА соответственно). Следовательно, при работе на аккумуляторах емкостью 10000 мА работоспособность устройств LoRa может сохраняться от 35 дней до нескольких лет.

Таким образом, для разработки программно-аппаратного комплекса, при организации децентрализованной сети, наиболее целесообразно использовать технологию LoRa.

СХЕМЫ КОММУТАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ MESH-СЕТИ ДЛЯ СЛУЧАЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОТОКОЛА LORA

Система организации связи на основе Mesh-сети, использующей технологии LoRa, может быть представлена как определенная совокупность радиоприемников и радиопередатчиков, взаимодействующих между собой в составе телекоммуникационного оборудования по схеме, показанной на рис. 2.



Рис. 2. Структурная схема взаимодействия абонентов Mesh-сети

Для организации коммуникационной сети необходимо обеспечить обработку данных, полученных от абонентов. Устройством, осуществляющим обработку данных, может быть ретрансляционный узел сети со средствами связи, основанными на технологии LoRa и являющимися частью Mesh-сети. Такой процесс возможно организовать в постоянных узлах сети связи [4], работающих автономно на мощных аккумуляторах или с использованием стандартных устройств LoRa, имеющих доверенный доступ к Mesh-сети. Также данная сеть может использоваться как альтернатива сотовой и мобильной связи. На рис. 3 представлена схема сбора данных с узлов Mesh-сети с конвертацией LoRa-пакетов в стандартные пакеты протоколов семейства TCP/IP и последующей отправкой содержимого пакетов по сети LTE в центры обработки данных. Для организации передачи данных достаточно подключиться к ретрансляторам LoRa и передать их по мобильной связи.

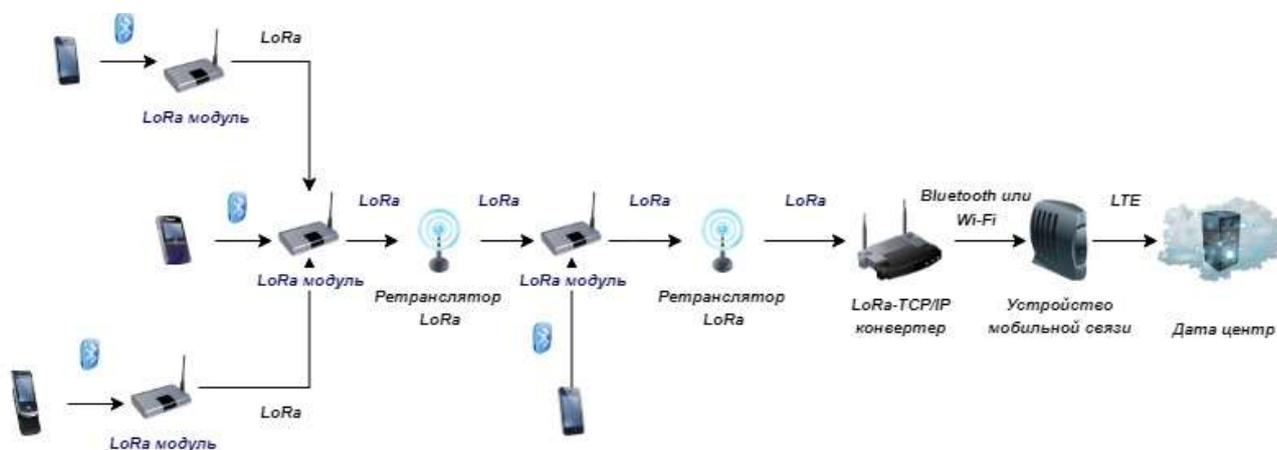


Рис. 3. Схема организации связи при передаче информации в центр обработки данных

Данная структура позволяет организовать контроль за абонентами сети в чрезвычайной ситуации, а также случаях, когда Mesh-сеть используется как альтернатива мобильной и сотовой связи, автономно собирая информацию с узлов сети и передавая ее в центры обработки данных.

Для получения доступа к такой сети необходимо подключиться к модулю LoRa по Bluetooth с помощью мобильного телефона и заранее установленного на нем мобильного приложения (Sideband или Meshtastic). Использование литиевых аккумуляторов емкостью 5000 мА и 10000 мА для модулей LoRa позволит иметь непрерывный доступ к глобальной городской Mesh-сети в течение 2–4 недель.

Однако в условиях плотной городской застройки, реализация предлагаемого проекта городской Mesh-сети может столкнуться с рядом проблем, связанных как с затуханием радиосигнала из-за многочисленных препятствий и особенностями рельефа местности, так и с наличием промышленных радиопомех. Устранить неблагоприятное влияние этих факторов на условия распространения сигнала и качество используемого канала радиосвязи весьма сложно. Здесь многое зависит от правильного выбора антенн для модулей, ретрансляторов и конвертеров сети. Как правило, каждый из этих элементов Mesh-сети комплектуется своим набором антенн, состав и технические характеристики которых у различных производителей оборудования существенно отличаются. Используемые антенны должны обладать целым рядом важных свойств, к числу которых относятся многодиапазонность, достаточная широкополосность, требуемые поляризация и форма диаграммы направленности, высокая помехоустойчивость, высокий уровень согласования (КСВ), большой коэффициент усиления, компактность, удобство эксплуатации.

При решении задачи максимизации радиуса площади радиопокрытия наиболее критичным для нас стал выбор многодиапазонных внутренних и внешних антенн для модулей Mesh-сети и мобильных телефонов, способных работать в диапазонах рабочих частот LoRa 433 МГц, 868 МГц и 915 МГц. Представленные на рынке типовые решения от известных вендоров не удовлетворили потребности разработчиков. Поэтому была предпринята попытка самостоятельно разработать требуемый вариант внутренней антенны для мобильного устройства на основе существующих технологий конструирования многодиапазонных внутренних антенн для сотовых телефонов.

Внимание авторов привлекли два технологических решения – решение японской компании «Hitachi Cable, Ltd.» [6], являющейся одним из мировых лидеров в области разработки и производства антенн для современных и перспективных мобильных средств радиосвязи, и решение, предлагаемое российскими разработчиками, представителями Специализированного конструкторского бюро Петровской академии наук и искусств (СКБ ПАНИ). Сопоставительный анализ технологий позволил сделать выбор в пользу отечественной разработки, которая оказалась значительно более эффективной и более перспективной.

На основе данных о технологии была разработана электромагнитная модель требуемого модифицированного варианта широкополосной многодиапазонной внутренней антенны для мобильного телефона для работы в диапазонах рабочих частот LoRa (433 МГц, 868 МГц и 915 МГц). Внешний вид модели этой антенны представлен на рис. 4.

Результаты моделирования подтвердили возможность создания многодиапазонной внутренней антенны для модуля LoRa, коэффициент усиления которой в 6–10 раз лучше, чем у антенн компании «Hitachi Cable». Расчетная диаграмма направленности антенны на одной из частот

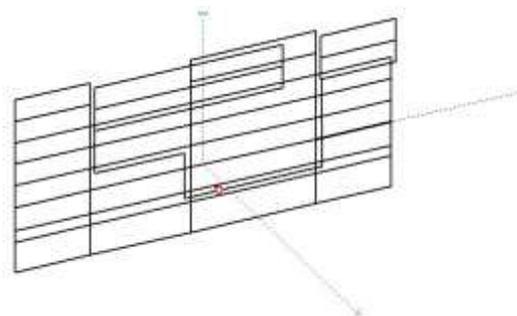


Рис. 4. Внешний вид модели многодиапазонной внутренней антенны для модуля LoRa, созданной в программе MMANA

представлена на рис. 5. По результатам моделирования был изготовлен действующий макет антенны, измеренные значения технических характеристик которого находятся в допустимых пределах.

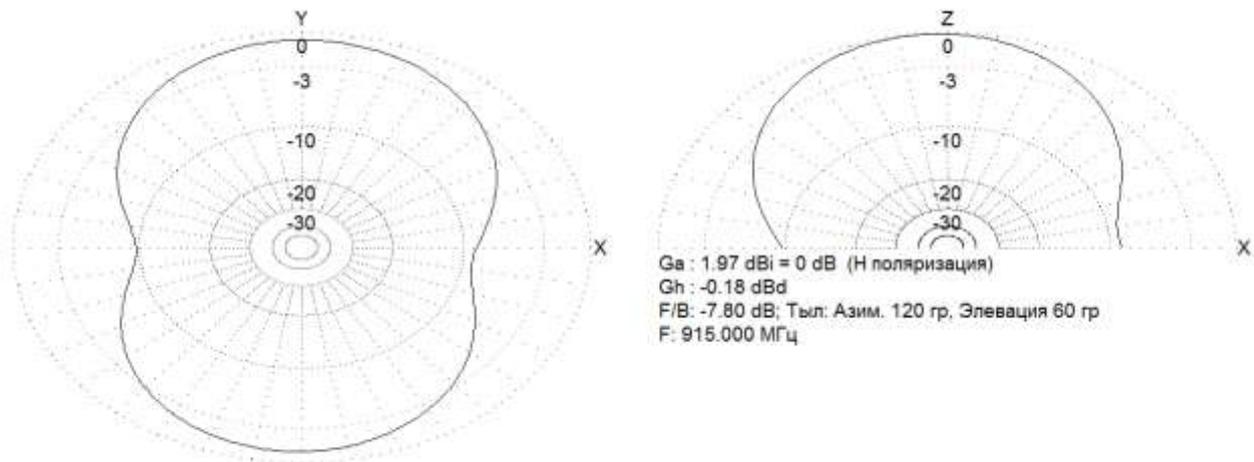


Рис. 5. Расчетная диаграмма направленности многодиапазонной внутренней антенны для модуля LoRa на одной из частот

Конструкция модуля с предложенной антенной (рис. 6) позволила увеличить радиус площади радиопокрытия в условиях плотной городской застройки в 2,5 раза – до 5 км. В результате применения разработанного модуля осуществляется организация Mesh-сети в г. Санкт-Петербург, содержащей не менее 69 узлов (рис. 7). Это подтверждается соответствующим расчетом, выполненным согласно методике [5]:

$$N = \frac{2 * P}{3\sqrt{3} * H^2} * l \approx \frac{2 * 1\,500\,000\,000}{3 * \sqrt{3} * 5\,000 * 5\,000} * 3 \approx 69, \quad (1)$$

где P – величина площади г. Санкт-Петербург;

H – величина радиуса площади покрытия;

l – коэффициент, показывающий количество узлов, требуемых для покрытия многоугольника.



Рис. 6. Модуль LoRa с действующим макетом модифицированной многодиапазонной антенны

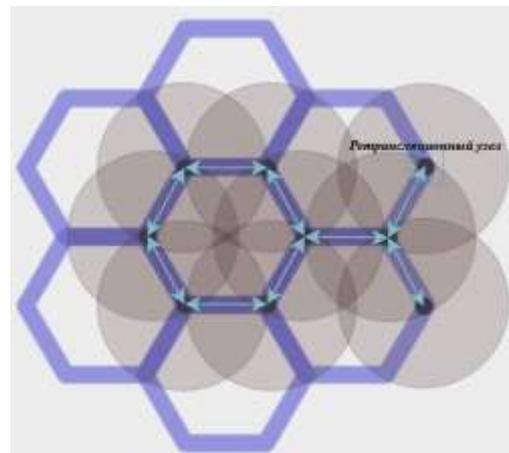


Рис. 7. Разбиение территории на соты и расположение ретрансляционных узлов

ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ ОПТИМАЛЬНОГО МАРШРУТА ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ПОСРЕДСТВОМ КРИПТОЗАЩИЩЕННОЙ MESH-СЕТИ

Диаграмма Венна, представленная на рис. 8, иллюстрирует построение Mesh-сети, коммутируемой по протоколу LoRa в двух режимах: ShortRange и LongRange. Режимы предназначены для уменьшения ретрансляционных переходов и увеличения скорости передачи данных. Это связано с особенностями демодуляции сигналов, направленных на повышение качественных характеристик канала связи.

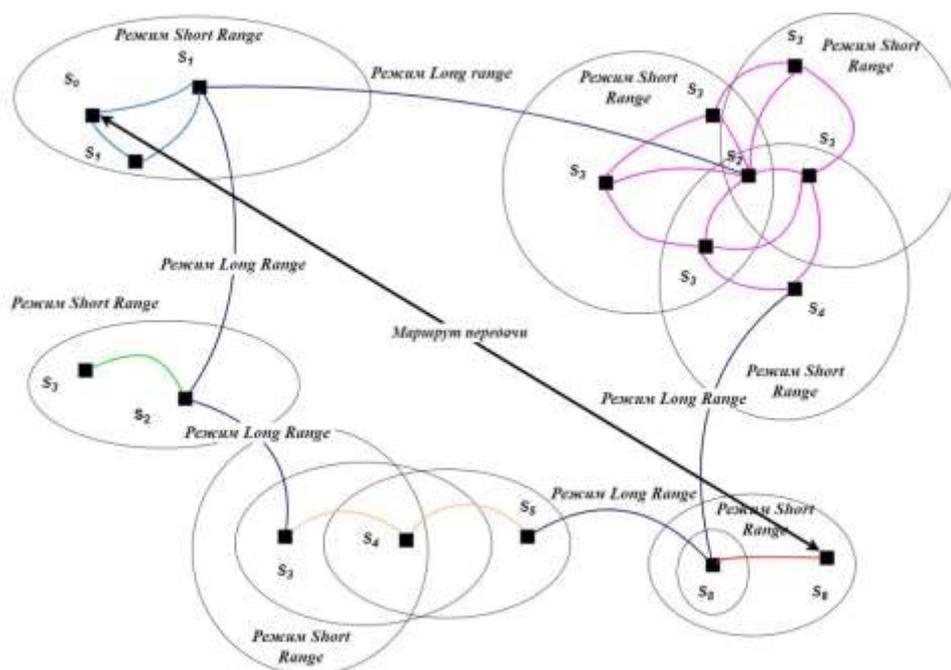


Рис. 8. Диаграмма Венна Mesh-сети

Для построения канала связи необходимо задать маршрутизацию и определить методику построения графа связи абонентов, который описывает Mesh-сеть. В предлагаемом подходе граф пути передачи информации можно представить формулой

$$Q = \langle Q_1, Q_2, \dots, Q_h \rangle, \quad (2)$$

где Q – маршрут передачи данных;

Q_i – адрес узла в сети;

h – число узлов в маршруте.

Каждый маршрут графа обладает числовой метрикой W , позволяющей выбрать оптимальный путь:

$$W = \frac{-h}{N} + \sum_{i=1}^h \begin{cases} 0, T_{Q_h} < T \\ \frac{T_{Q_h}}{T}, T_{Q_h} \geq T \end{cases} + \frac{\sum_{i=1}^h v_{Q_i}}{v_{max}}, \quad (3)$$

где N – общее число узлов в видимой сети;

T_{Q_h} – оценка производительности узла Q_h , определяемая вычислительной возможностью устройства для обработки информации;

T – величина объема ресурсов в одном блоке протокола [7];

v_{Q_i} – скорость приема данных узлом Q_i ;

v_{max} – максимальная скорость принятия данных узлом Q_h .

Таким образом, в Mesh-сети оптимальные маршруты определяются путем сравнения их числовых метрик W . Чем выше числовая метрика, тем более вероятен выбор данного пути для передачи данных.

Процесс обеспечения безопасности информации [8] при организации Mesh-сети осуществляется путем применения алгоритма блочного шифрования AES-256, поддержка которого реализована в архитектуре микропроцессора ESP32. Для организации защищенного канала связи (рис. 9) производится настройка доверенной среды абонентов в виде обмена сессиями с помощью сканирования QR-кода для получения цифровой подписи HMAC SHA-256 и ID устройства с модулями LoRa. В таком случае каждый пакет данных отправляется пользователю только по доверенному каналу связи.

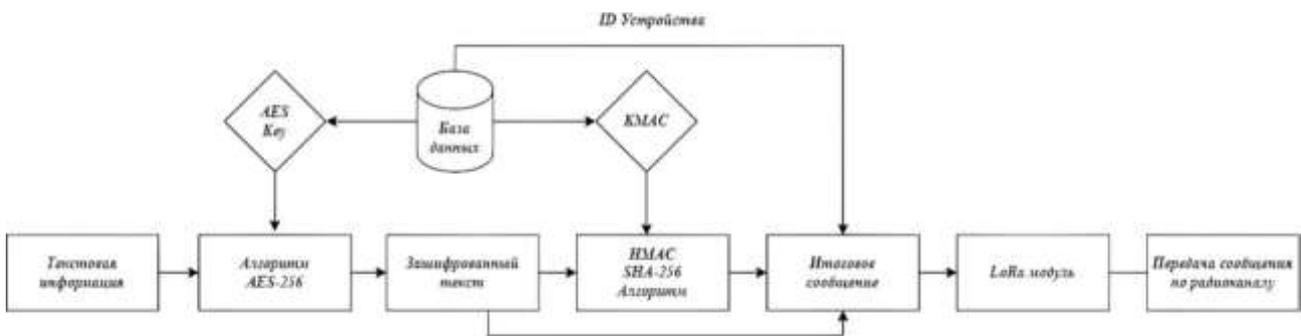


Рис. 9. Процесс обеспечения безопасности информации

Блок данных T состоит из зашифрованного сообщения M , хэша HMAC, счетчика узлов C и идентификатора устройства DID :

$$T = M + \text{HMAC} + C + DID. \quad (4)$$

Следовательно, передаваемая информация шифруется алгоритмом AES-256, а для обеспечения возможности проверки целостности используется функция хэширования HMAC SHA-256. Также, для защиты от злонамеренных действий нарушителей, в том числе автоматизированной рассылки запросов, отправляемых с помощью программно-определяемого радио, в отправляемый запрос включаются счетчик узлов и идентификатор устройства. Данный метод позволяет контролировать зону покрытия распределенной сети в случае неправомерных действий нарушителя. Эту процедуру осуществляют встроенные функции в микропроцессоре ESP32 и обработчик сообщений в Android-приложении. В ходе практической реализации использовалось API Protobufs, с помощью которого был разработан модуль *forward* [9], позволяющий на программном уровне организовать контроль автоматической пересылки сообщений через буфер протокола сериализации *storeforward.proto*.

Модуль *forward* осуществляет запись полученных сообщений в хранилище, в котором производится фильтрация принятой информации на факт дублирования. Таким образом, в случае наличия объектов, уже находящихся в базе данных, происходит отмена записи и эти сообщения не отображаются в окне текстового чата абонентов. Их дальнейшая ретрансляция выполняется только в том случае, если показания счетчика узлов не больше требуемого значения. Такая процедура необходима для исключения возможности зашумления канала связи и осуществления правильной организации обработки присылаемых и отправляемых сообщений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы авторами был предложен подход к созданию программно-аппаратного комплекса передачи данных между несколькими устройствами по протоколу LoRa. Прорабо-

тана возможность обеспечения безопасности передаваемой информации, основанная на применении алгоритма шифрования AES-256 и функции хэширования HMAC SHA-256. Показаны основные преимущества использования технологии Mesh-сети для увеличения дальности связи в условиях чрезвычайной ситуации как альтернативы мобильной и сотовой связи. Разработан подход для контроля за абонентами сети путем отправки информации в центры обработки данных.

Список используемых источников

1. *Сомов А. М., Корнев С. Ф.* Спутниковые системы связи : учеб. пособие для вузов. – М. : Горячая линия – Телеком, 2012. – 244 с.
2. *Дэвис, Джозеф А.- ст.* Анализ производительности сети и датчиков в беспроводных сетях MESH IEEE 802.x в тактической сетевой топологии (TNT). – Монтерей Калифорния : Военно-морская аспирантура, 2005. – URL: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=0ea35ba26b311a0fbbc1703cf4637e02333b154e> (дата обращения: 16.02.2024).
3. Технология LoRa. – URL: <https://habr.com/ru/companies/realtrac/articles/304312/> (дата обращения: 25.10.2023).
4. *Стив П., Ананд В.* Узел беспроводных датчиков для автономного мониторинга и оповещения в удаленных средах. – URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20150012213/downloads/20150012213.pdf> (дата обращения: 17.11.2023).
5. *Лохвицкий М. С., Сорокин А. С., Шорин О. А.* Мобильная связь: стандарты, структуры, алгоритмы, планирование. – М. : Горячая линия – Телеком, 2018. – 264 с.
6. Triple-band Internal Antenna for Clamshell type Mobilephone / Н. Tate [et al.] // Hitachi Cable Review. – 2003. – № 22. – URL: <https://vdocuments.mx/triple-band-internal-antenna-for-clamshell-type-mobilephone.html> (дата обращения: 07.03.2024).
7. Технология LoRaWAN. – URL: <https://itechinfo.ru/content/обзор-технологии-lora> (дата обращения: 17.05.2024).
8. Зашифрованная радиосвязь и режимы конфиденциальности AES256 в системе DMR. – URL: <https://sicom.ru/projects/zashifrovannaya-radiosvyaz-i-rezhimy-konfidentialnosti-dmr.html> (дата обращения: 25.10.2023).
9. Module meshtastic::protobufs::store_and_forward. – URL: https://docs.rs/meshtastic/latest/meshtastic/protobufs/store_and_forward/index.html (дата обращения: 13.11.2023).

Д. Н. Бирюков,
доктор технических наук, профессор;
О. О. Захаров;
Т. Р. Сабиров,
кандидат технических наук

ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ СИСТЕМЫ ЗНАНИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОЦЕНИВАНИЯ ЗАЩИЩЕННОСТИ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Рассмотрена проблема совместного применения открытых источников данных об уязвимостях программного обеспечения (ПО), тактиках и техниках злоумышленников с различными программными средствами аудита информационной безопасности (ИБ) информационно-технических систем (ИТС). Предложен подход к синтезу системы знаний для порождения сценариев проведения тестирования защищенности ИТС, учитывающих требования по ИБ на конкретном объекте. Сформированы предложения по внедрению и применению проектируемой системы знаний в программных продуктах.

Ключевые слова: информационная безопасность, тестирование на проникновение, аудит информационной безопасности, система знаний, модель знаний.

ВВЕДЕНИЕ

Возрастающее количество угроз, возникающих в области компьютерной безопасности, привело к созданию различных классификаторов, матриц, баз данных уязвимостей, которые используются в деятельности специалистов, обеспечивающих ИБ ИТС. Однако разнообразие источников информации, отличающаяся функциональность, а также особенности реализации средств проведения аудита ИБ и их структурно различающиеся выходные данные (отчеты) не позволяют специалисту оперативно сформировать сценарий (план) проведения тестирования защищенности ИТС с учетом вводимых ограничений. Решение этой проблемы позволит сократить время при планировании и проведении аудита информационной безопасности различных ИТС с учетом ограничений заказчика.

ОБЗОР ИСТОЧНИКОВ ДАННЫХ О РАЗЛИЧНЫХ КИБЕРУГРОЗАХ

Наиболее известным и хорошо структурированным источником является матрица MITRE ATT&CK [1]. Она содержит в себе основные этапы (тактики) проведения компьютерной атаки, а также виды (техники) и способы (процедуры) их реализации. Кроме того, имеет базу существующих АРТ (*Advanced Persistent Threat*) группировок, их инструментов, совершенных атак, а также тактик, техник и процедур (ТПП) для каждой из них. MITRE Corporation предоставляет свободный доступ к выгрузке матрицы в форматах STIX и Excel. Язык STIX (*Structured Threat Information Expression*) [2] предназначен для структурированного хранения данных о киберугрозах (*Cyber Threat Intelligence*), о группах, индикаторах компрометации, применяемых в атаках инструментах и других сущностях, позволяющих наиболее полно описать произошедшие инциденты информационной безопасности. Для описания используются следующие объекты (STIX 2.0, существует версия 2.1 с рядом новых сущностей):

- 1) *Attack Pattern* (шаблон атаки);
- 2) *Campaign* (атака);
- 3) *Course of Action* (действия по нейтрализации атаки);
- 4) *Identity* (личность, организация и т.п.);
- 5) *Indicator* (индикатор компрометации);

- 6) *Intrusion Set* (набор данных о поведении конкретной группировки);
- 7) *Malware* (вредоносное программное обеспечение);
- 8) *Observed Data* (обнаруженные данные);
- 9) *Report* (отчет о группировках, атаках);
- 10) *Threat Actor* (группировка);
- 11) *Tool* (утилита, легитимное программное обеспечение);
- 12) *Vulnerability* (уязвимость в программном обеспечении).

Кроме того, в языке STIX используются так называемые «связки», устанавливающие разнородные связи между объектами. Существует два типа связок:

- 1) *Relationship* (отношение);
- 2) *Sighting* (наблюдение).

Моделью знаний, применяемой в STIX, является семантическая сеть – ориентированный граф, в котором вершины графа (прямоугольники) соответствуют объектам, а дуги (линии) означают отношения между ними (рис. 1). Существует ряд отношений: *targets* (нацелен), *uses* (использует), *indicates* (указывает), *mitigates* (смягчает), *attributed-to* (отнесен к чему-либо), *variant-of* (разновидность чего-либо), *impersonates* («мимикрирует»), *related-to* (относится к чему-либо) и некоторые другие. На рисунке связи идут не от свойств, а от самих сущностей.

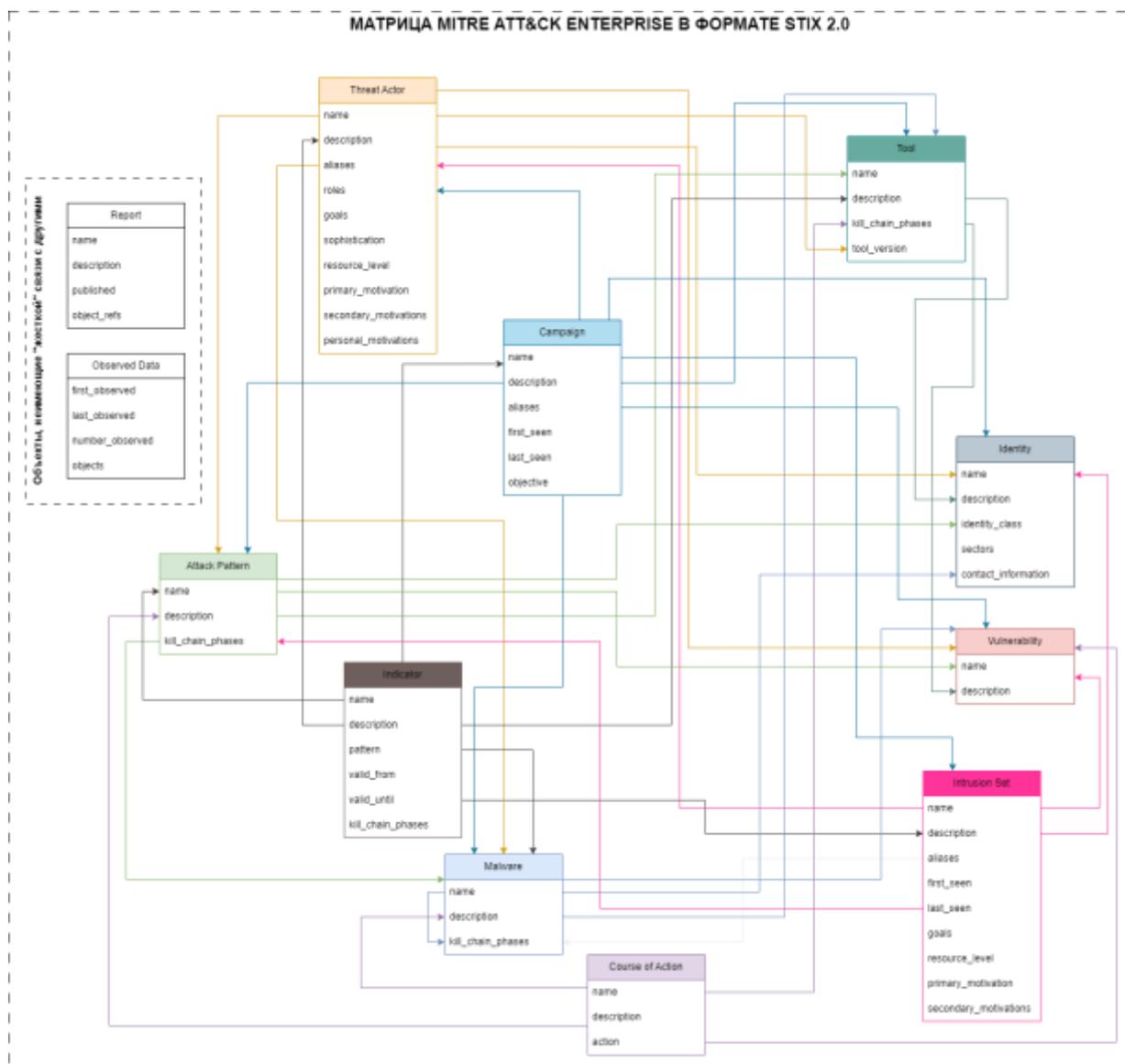


Рис. 1. Представление знаний о киберугрозах в языке STIX 2.0

Также в ходе проведения аудита ИБ необходимо использование баз данных уязвимостей, позволяющих на основании названия ПО и его версии показать возможные уязвимости в продуктах, а в ряде случаев, имеющих ссылки на репозитории с эксплоитами. Основными открытыми и регулярно обновляемыми базами являются:

1) БДУ ФСТЭК России – российская база данных, находящаяся в свободном доступе, имеет более 52000 записей об уязвимостях, обнаруженных за период с 2014 года по настоящее время [3];

2) MITRE CVE (*Common Vulnerabilities and Exposures*) – ведется MITRE Corporation, содержит более 220000 записей об уязвимостях, обнаруженных за период с 1999 года по настоящее время [4];

3) NVD (*National Vulnerability Database*) – ведется Национальным институтом технологий и стандартов (NIST) США. Представляет собой ту же базу данных MITRE CVE, но с дополненными данными (ссылки на источники, меры по предотвращению эксплуатации) [5];

4) ExploitDB – ведется командой Offensive Security, содержит более 45000 готовых эксплоитов и описаний по их созданию [6].

Каждый из этих источников может быть загружен с официального сайта в различных форматах (JSON, XML, Excel), а ExploitDB выгружен [7] со всеми доступными эксплоитами и описаниями к ним (подобным образом реализовано в дистрибутиве Kali Linux). Структурой хранения информации в вышеперечисленных базах данных является таблица с практически одинаковыми по семантике полями (идентификатор уязвимости, дата обнаружения, тип, CVE-идентификатор и др.), но в случае с ExploitDB дополнительно используется поле с указанием пути к файлу эксплоита или описание по его реализации.

Кроме матриц и баз данных уязвимостей стали появляться списки обнаруживаемых различными средствами защиты ТПП. Так, например, компания Tidal Cyber представила реестр (рис. 2) продуктов для защиты от продвинутых угроз (APT) с учетом тех ТПП, которые обнаруживают продукты [8]. Данная информация может помочь при планировании мероприятий по обеспечению информационной безопасности ИТС, поскольку появляется возможность понять «слепые зоны» установленных средств защиты.

Capability	Type	Technique(s)	Platform(s)	Description	Availability	Actions
AccessSystem	Detect	OS Credential Dumping Security Account Manager	Windows	Sensitive user information was queried	Default On	
AccessSystem	Protect	OS Credential Dumping Security Account Manager	Windows	Sensitive user information was queried	Default Off	
AccountDiscovery	Detect	Account Discovery Remote System Discovery	Windows	An attempt to get a listing of accounts on a system wa...	Default On	
AccountDiscovery	Protect	Account Discovery Remote System Discovery	Windows	An attempt to get a listing of accounts on a system wa...	Default Off	
AccountDiscovery(Linux)	Protect	Account Discovery Local Account Domain Account	Linux	An attempt to get a listing of accounts on a system wa...	Default Off	

Рис. 2. Таблица распознаваемых ТПП известным зарубежным продуктом

Вышеперечисленные источники являются разными по структуре, наполнению, а также функциональному предназначению, поэтому существует необходимость синтеза единой системы знаний для решения задач по тестированию защищенности ИТС.

ПОДХОД К ФОРМАЛИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИИ ОБ ИНСТРУМЕНТАХ ПРОВЕДЕНИЯ АУДИТА ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

При организации взаимодействия между различными программными средствами аудита необходимо учитывать особенности их реализации, а также формат входных и выходных данных. Для решения данной проблемы предлагается использовать модель «сущность – транслятор – сущность», используя для хранения данных фреймовую модель представления знаний (фреймы «сущность», «транслятор», «функциональность» со слотами, максимально позволяющими их описать). Суть подхода заключается в формализации получаемых на выходе результатов работы программных средств в сущности (рис. 3) и последующая передача их другим трансляторам. Использование фреймовой модели обусловлено удобством использования, гибкостью и расширяемостью, а также возможностью комбинирования иных моделей представления знаний. Предполагается использование базы данных со всеми используемыми сущностями с возможностью пополнения новыми.

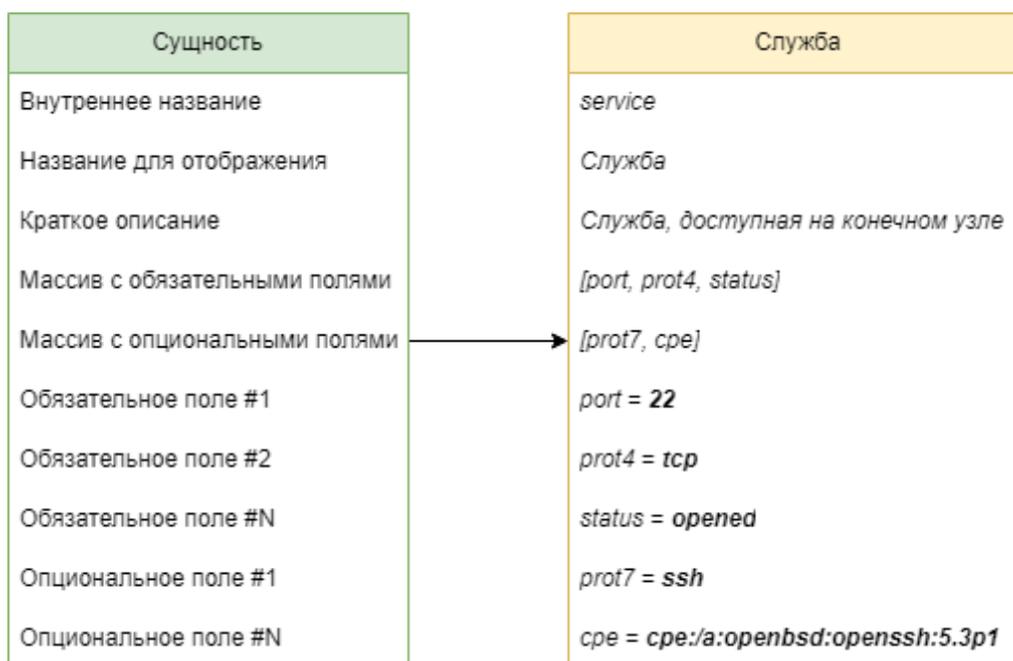


Рис. 3. Описание и пример сущности

Трансляция (трансформация) (рис. 4) является «оберткой» над программным средством и упрощает работу оператора программного комплекса за счет сокрытия вопросов взаимодействия с программным средством аудита. В ней описываются все необходимые функциональные спецификации, особенности применения, а также требования для запуска. Это обусловлено тем, что большинство современных средств аудита ИБ имеют обширную функциональность, а также различные режимы работы. Примером может выступать сканер портов Nmap. Данный программный продукт может сканировать разными методами, скоростью, а также использовать пользовательские скрипты. Аналогично сущностям существует набор сохраненных трансляций.

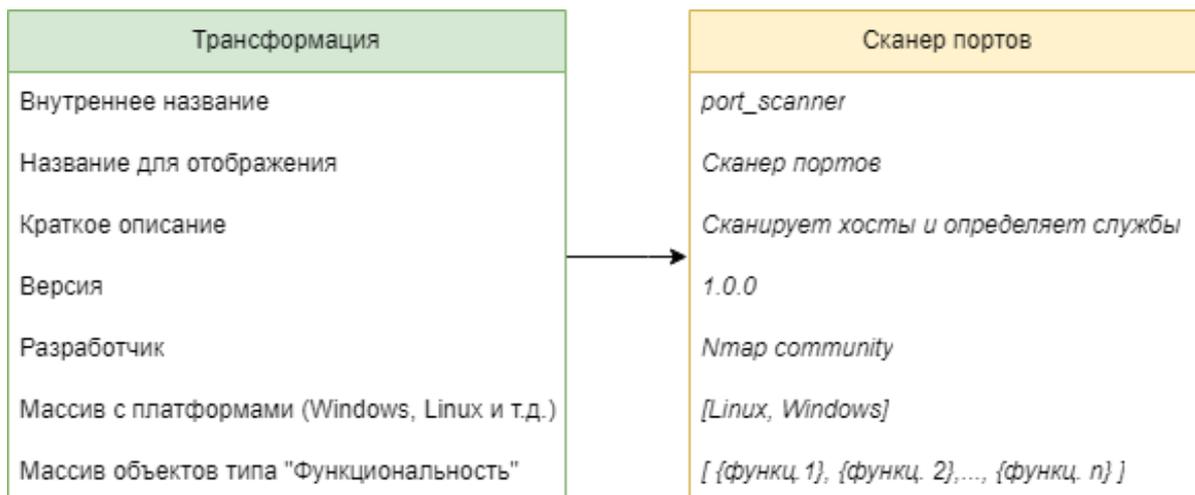


Рис. 4. Описание и пример трансформации

Поскольку многие инструменты имеют множество аргументов для запуска и, соответственно, по-разному проводят аудит ИБ – агрессивно, быстро, выдают другие сущности и т. д., авторами было определено понятие «функциональность». Функциональность – это описание тех возможностей, которыми располагает средство аудита, а также необходимая информация о том, на каких этапах аудита применяются необходимые сущности для работы и теги для задания ограничений при планировании (рис. 5).

Стоит отметить, что функция для вызова – это процедура-слуга, которая запускается по запросу, т. е. при вызове ядром программного комплекса. При вызове функции не требуется знать названия аргументов командной строки инструмента, достаточно подать на вход требуемые сущности, а в теле функции произойдет их подстановка в строго заданный шаблон аргументов.



Рис. 5. Описание и пример функциональности программного средства аудита ИБ

Применение подхода, предложенного выше, позволит формализовать и систематизировать получаемые от средства аудита результаты, функциональные возможности и особенности инструментов. Кроме того, при введении различных ограничений заказчиком имеется возможность по оптимальному и верному выбору применяемых средств.

ВЫБОР МОДЕЛЕЙ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДАННЫХ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ РАЗРАБАТЫВАЕМОЙ СИСТЕМЫ ЗНАНИЙ

Информация, содержащаяся в базах данных уязвимостей, описанных выше, представлена различными моделями представления знаний: семантической сетью, фреймовой и реляционной моделями представления данных. Стоит отметить, что каждая из них имеет свои достоинства и недостатки:

1. Различные виды отношений между множеством сущностей проще описывать *семантической сетью*, как это и осуществляется при представлении матрицы MITRE ATT&CK в формате STIX.

2. Вложенные друг в друга объекты (сущности) удобнее описывать *фреймовой моделью* представления знаний, авторами данный подход применяется при описании инструментов и их функциональных возможностей.

3. *Реляционную модель* удобно применять для хранения и предоставления доступа к объектам, имеющим одинаковый набор свойств, например при работе с базами данных об уязвимостях.

Учитывая данные обстоятельства, требуется разработать механизм взаимодействия с различными моделями представления (хранения) знаний и их наполнения новыми данными. Однако первоначально стоит определить единый формат базы данных уязвимостей, поскольку хранить и поддерживать в актуальном состоянии несколько баз одновременно нецелесообразно. Обязательными полями могут являться (названия могут отличаться):

- 1) «soft_name» – название ПО, в котором была найдена уязвимость;
- 2) «version» – версия ПО;
- 3) «description» – словесное описание уязвимости;
- 4) «cpe» – описание уязвимого продукта по спецификации CPE;
- 5) «cve» – идентификационный номер по классификации CVE;
- 6) «cvss» – количественная оценка по шкале CVSS;
- 7) «cwe» – классификация по перечню «общих» типов недостатков в коде ПО (CWE);
- 8) «bdu» – идентификационный номер в БДУ ФСТЭК России;
- 9) «type» – тип уязвимости по возможным последствиям: RCE, LPE, DoS;
- 10) «date» – дата выявления;
- 11) «mitigations» – меры по устранению уязвимостей;
- 12) «is_fixed» – существует ли исправление уязвимости;
- 13) «exploit_db_path» – путь в репозитории эксплоитов ExploitDB;
- 14) «risk» – оценка по трехбалльной шкале возможности аварийного завершения работы сервиса или «падения» удаленного хоста – отсутствует, вероятный, высокий риск. Риск оценивается экспертами, испытавшими эксплоит, например в тестовой среде.

Вышеперечисленной информации хватает для планирования мероприятий по проведению аудита ИБ, их проведению и подготовки отчетной информации заказчику.

ПОДХОД К ДИАГНОСТИРОВАНИЮ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УРОВНЯ ИХ ЗАЩИЩЕННОСТИ

Процесс аудита информационной безопасности ИТС может быть описан в терминах теории диагностики технических систем [9]. Объектом выступает телекоммуникационная система, которая состоит из множества элементов – хостов, а сами хосты можно, например, разделить на операционные системы (ОС) и сервисы, функционирующие на них. Кроме того, одним из условий является наличие как минимум двух взаимоисключающих состояний системы – работоспособное и неработоспособное (отказ), которые также возможно выделить в телекоммуникационной системе.

Стоит отметить, что диагностика технических систем призвана решать ряд необходимых в данной работе задач – обеспечение безопасности функционирования работы технической системы, функциональной надежности работы системы (возможность выполнения ИТС задач по предназначению), уменьшение потерь от простоев в результате отказов (например, при эксплуатации уязвимости, вызывающей перевод операционной системы в неработоспособное состояние).

Диагностирование призвано определять техническое состояние объекта. В данной же работе речь идет об общей оценке защищенности ИТС от различных видов программного воздействия. Вся система или ее элемент могут являться объектом технического диагностирования. Процесс диагностирования представляет собой многократную подачу на объект определенных сигналов и анализа ответов на них. Примером инструмента может являться сканер портов Nmap, который отправляет пакеты на порты, получает ответы, анализирует и предоставляет пользователю различную информацию, вплоть до информации об уязвимых сервисах.

Однако состояние и техническое состояние не являются эквивалентными понятиями. Рассматривая эти понятия в контексте решаемой в данной работе задачи, их можно объяснить следующим образом:

- 1) состояние – набор запущенных на конечном узле сервисов, их версии, операционная система;
- 2) техническое состояние – спецификация процесса, например, обнаружение уязвимого сервиса, установление стандартного пароля производителя оборудования и т. п.

Таким образом, вывод о защищенности ИТС можно сделать из сопоставления состояния системы (сервисов, их версий и т. д.) с априорно заданными значениями (записями в БД уязвимостей, базами паролей и т. д.) для отнесения к какому-либо виду его технического состояния.

Состояние ИТС описывается моделью, которая строится в ходе идентификации. Идентификация – процесс построения модели объекта по реализациям его входных и выходных сигналов, предшествующий процессу определения его технического состояния. Построение модели может быть многошаговым (итерационным) процессом, что всегда происходит при аудите информационной безопасности. Данная особенность обусловлена тем, что специалист, осуществляющий аудит ИБ, не видит всей ИТС в целом, а лишь ее часть (хост, узел), т. е. частично наблюдает ее. Применение множества инструментов, имеющих различающуюся функциональность и предназначение, позволяет успешно решать задачи аудита и достигать цели – получать комплексную оценку защищенности ИТС.

Кроме того, необходимо отметить, что различают два метода идентификации по характеру входного воздействия: активный и пассивный (рис. 6). Это позволяет в полной мере использовать теорию диагностирования технических систем [9], поскольку инструменты аудита также можно разделить на эти категории. Активными могут быть сканеры уязвимостей, утилиты подбора паролей, перебора директорий веб-сайта и т. д., а пассивными, например, средства записи и анализа сетевого трафика.



Рис. 6. Классификация методов идентификации

Таким образом, процесс аудита ИБ ИТС является процессом технического диагностирования с использованием итерационной активной идентификации частично наблюдаемой системы.

ОБОБЩЕННЫЙ ПРИМЕР ПРИМЕНЕНИЯ ПРЕДЛОЖЕННОЙ СИСТЕМЫ ЗНАНИЙ И ПОДХОДА К ДИАГНОСТИРОВАНИЮ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ ПОРОЖДЕНИЯ СЦЕНАРИЕВ АУДИТА ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Представленные выше базы данных уязвимостей с определенными для них моделями представления знаний, а также подход к диагностированию ИТС позволяют порождать сценарии аудита ИБ, учитывающие требования заказчиков, а также возможности существующих инструментов.

Взаимодействие между всеми моделями обеспечивается при помощи механизма вывода, который представляет собой алгоритм поиска решения поставленной задачи, исходя из фактов, хранящихся в базе знаний и запроса пользователя. Решением в данном случае будет выступать частичный, дополняемый план диагностирования ИТС. Совместное использование данных из представленных выше источников позволит повысить оперативность и полноту планирования мероприятий по тестированию защищенности информационно-технических систем.

Рассмотрим пример входных данных, доступных специалисту, проводящему аудит ИБ:

- IP адрес одного из хостов ИТС;
- необходимость быстрого проведения аудита ИБ.

Следует учесть следующее ограничение: запрет на эксплуатацию уязвимостей в сетевом оборудовании, операционных системах Windows и Linux (такие ограничения бывают на важных объектах, продолжительное время непрерывной работы которых крайне необходимо для различных сфер жизнедеятельности людей).

С учетом описанных выше входных данных и ограничений приведем пример работы алгоритма порождения сценариев аудита, работающего итеративно, в полуавтоматическом режиме.

1. При использовании *формализованных описаний функциональных спецификаций средств аудита* ИБ производится поиск подходящих под «fast», «aggressive», принимающих на вход сущность «IP» (сканеры портов, различные вспомогательные инструменты).

2. Производится ранжирование списка в соответствии с порядком введенных тегов.

3. После получения ответа пользователя на выбор определенного инструмента производится его запуск и анализ результатов.

4. Аналогично п. 1 производится поиск инструментов по соответствующим критериям, принимающим, например, сущность «Сервис».

5. Аналогично п. 2 производится ранжирование списка инструментов.

6. После получения ответа от пользователя на выбор инструмента, производится запуск и *анализируется результат*.

7. Пусть, например, инструмент обнаружил две уязвимости (*используя БД уязвимостей*) в сервисах, одна из них направлена на повышение привилегий, другая же эксплуатирует уязвимость в ОС. Алгоритм добавляет в память программного комплекса первую и игнорирует вторую (только уведомляет специалиста).

8. Цикл повторяется до того момента, пока существуют инструменты и (или) эксплойты для уязвимостей, соответствующие входным данным.

Алгоритм работает циклично и по факту представляет собой механизм вывода из системы знаний, а также управления средствами аудита ИБ. Это необходимо потому, что невоз-

можно за одну итерацию построить сценарий проведения аудита ИБ для частично наблюдаемой информационной системы (одного хоста из всего домена). Применяя подход на основе итерационной активной идентификации с использованием предложенной системы знаний, возможно наиболее правильно, в соответствии с требованиями заказчиков, проводить аудит ИБ ИТС.

Рассмотренная система знаний для порождения сценариев аудита ИБ требует ряда уточнений в части программной реализации, поскольку содержит в себе различные модели представления знаний, с которыми необходимо взаимодействовать.

Для получения информации из матрицы MITRE ATT&CK в формате STIX может применяться библиотека *mitre-python* [10], которая позволяет работать с матрицей простыми методами без углубления в структуру хранения. На данный момент она поддерживает использование базы только в формате STIX 2.0, но и данной спецификации языка достаточно для выполнения всех необходимых задач по порождению сценариев тестирования информационно-технических систем.

База данных уязвимостей может быть нереляционной, например, MongoDB, поскольку это наиболее простой вид представления для данной задачи. Аналогично и в случае информации о распознаваемых ТПП средствами защиты. Однако возможно применение реляционного варианта, поскольку ряд источников может быть между собой связан.

Для хранения информации об инструментах и их возможностях можно использовать формат JSON, который легко читается специалистом и машиной, а также крайне просто заполняется. Трансляции представляют собой файл описания в формате JSON и Python-скрипт, где реализованы функции, имена которых указываются в слотах фреймов «функциональность» как процедуры-слуги.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа существующих источников информации об уязвимостях ПО, тактиках и техниках злоумышленников, возможностях СЗИ по выявлению угроз был предложен подход по созданию единой системы знаний и взаимодействию с различными средствами аудита ИБ.

Предложен вариант формализации возможностей инструментов аудита и их выходных данных, позволяющий организовать взаимодействие с другими средствами, с помощью высокоуровневых конструкций (сущностей). Рассмотрен подход к диагностированию информационно-технических систем, использующий систему знаний для порождения сценариев аудита ИБ с учетом вводимых ограничений, что позволяет повысить точность и оперативность планирования и реализации мероприятий по тестированию защищенности корпоративной инфраструктуры.

Список используемых источников

1. Matrix-Enterprise | MITRE ATT&CK® : [сайт]. – URL: <https://attack.mitre.org/matrices/> (дата обращения: 21.03.2024).
2. STIX™ Version 2.0. Part 2: STIXObjects : [сайт]. – URL: <https://docs.oasis-open.org/cti/stix/v2.0/cs01/part2-stix-objects/stix-v2.0-cs01-part2-stix-objects.html> (дата обращения: 21.03.2024).
3. БДУ – Уязвимости : [сайт]. – URL: <https://bdu.fstec.ru/vul> (дата обращения: 21.03.2024).
4. Home|CVE : [сайт]. – URL: <https://www.cve.org/> (дата обращения: 21.03.2024).
5. NVD – Home : [сайт]. – URL: <https://nvd.nist.gov/> (дата обращения: 21.03.2024).
6. Exploit Database – Exploits for Penetration Testers, Researchers, and Ethical Hackers : [сайт]. – URL: <https://www.exploit-db.com/> (дата обращения: 21.03.2024).

7. Exploit-DB / Exploits + Shellcode + GHDB GitLab : [сайт]. – URL: <https://gitlab.com/exploit-database/exploitdb> (дата обращения: 21.03.2024).
8. Tidal Cyber – Product Registry : [сайт]. – URL: <https://app.tidalcyber.com/vendors> (дата обращения: 21.03.2024).
9. *Дмитриев А. К., Юсупов Р. М.* Идентификация и техническая диагностика. – М. : МО СССР, 1987. – 521 с.
10. GitHub – mitre-attack/mitreattack-python: A python module for working with ATT&CK : [сайт]. – URL: <https://github.com/mitre-attack/mitreattack-python> (дата обращения: 21.03.2024).

И. А. Бугаев,
кандидат военных наук;
В. В. Данилов,
кандидат технических наук

МОДЕЛЬ МОНИТОРИНГА DNS-ТРАФИКА В ЗАДАЧАХ РАССЛЕДОВАНИЯ КОМПЬЮТЕРНЫХ ИНЦИДЕНТОВ, СВЯЗАННЫХ С ЭКСПЛУАТАЦИЕЙ ВРЕДНОСНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

В статье рассматриваются использование элементов DNS-инфраструктуры при формировании скрытого канала передачи данных от вредоносного программного обеспечения, этапы его развертывания. Представлена модель мониторинга DNS-трафика в целях определения эксплуатации вредоносного программного обеспечения на основе индикаторов подозрительной активности.

Ключевые слова: компьютерные инциденты, несанкционированный доступ, сетевая служба DNS, параметры сетевого трафика, канал передачи, вредоносное программное обеспечение, сетевые взаимодействия.

ВВЕДЕНИЕ

В эпоху стремительного развития информационных технологий поток данных, циркулирующий в различных информационно-телекоммуникационных сетях организаций с использованием глобальной компьютерной сети Интернет (ГКС Интернет), перманентно увеличивается. Соответственно число нарушений в сфере информационной безопасности, направленные на получение несанкционированного доступа к информации, неуклонно растет. Так в 2022–23 годах злоумышленники чаще всего проникали в инфраструктуру организаций [1, 2] при помощи эксплуатации уязвимостей в публично доступных приложениях. Однако по сравнению с предыдущим периодом доля вектора компьютерных атак (КА) снизилась, а доля случаев проникновения с использованием вредоносного программного обеспечения (ВПО) напротив, возросла.

В связи с этим своевременное обнаружение действий ВПО в настоящее время является весьма актуальным. Так как поведенческий анализ сетевого трафика по выявлению КА является более эффективным [3, 4], в данной работе разработана модель мониторинга DNS-трафика в задачах расследования компьютерных инцидентов, связанных с эксплуатацией вредоносного программного обеспечения, что обеспечивает их своевременное обнаружение и минимизацию деструктивных воздействий на информационную систему.

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ КЛИЕНТ-СЕРВЕРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ЗАДАЧАХ ОБНАРУЖЕНИЯ ВРЕДНОСНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Исследования специфики функционирования ГКС Интернет при решении задач расследования компьютерных инцидентов всегда были и остаются чрезвычайно актуальными. Как известно, функционирование ГКС Интернет обеспечивают различные сетевые сервисы. В связи с этим проведен анализ [2–4] статистических данных по уязвимостям сетевых сервисов ГКС и используемым протоколам информационного обмена (рис. 1, 2), который позволил оценить объем данных, передаваемых с помощью различных коммуникационных протоколов, используемых следующими сетевыми сервисами:

- 1) веб-сервисом (протоколы HTTP/HTTPS);

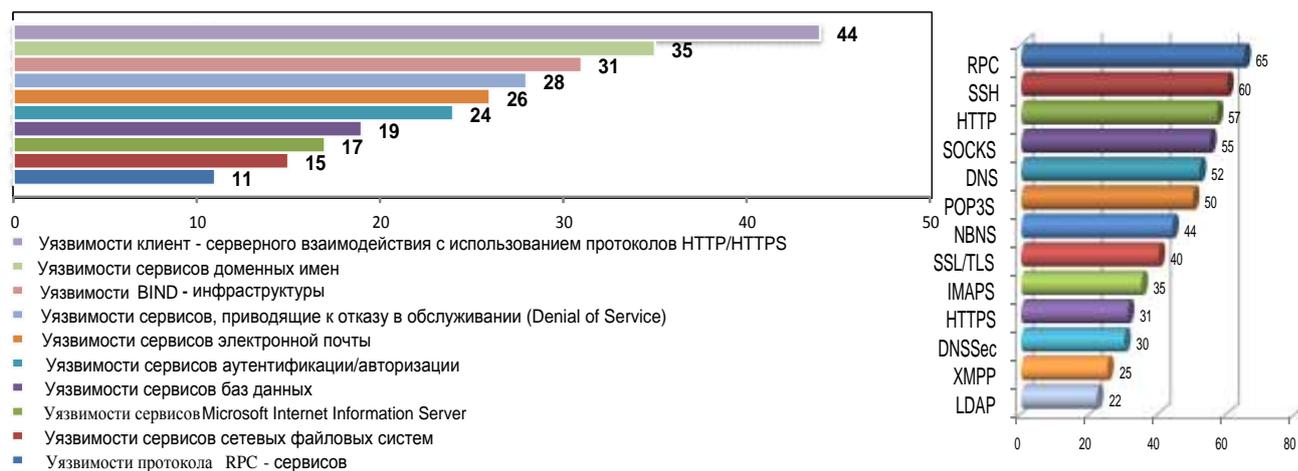


Рис. 1. Наиболее распространенные уязвимости сетевых сервисов ГКС

- 2) сервисами доменных имен (протокол DNS и его расширений (DNSSEC, DNSCrypt), BIND-инфраструктура);
 - 3) сервисами электронной почты (протоколы SMTP, POP3, IMAP);
 - 4) механизмами защиты информации (аутентификации и авторизации);
 - 5) сетевыми службами для передачи информации, используемыми нарушителями, вследствие эксплуатации их слабых мест:
 - существование доступных интерфейсов удаленного доступа и управления сетевым оборудованием и серверами;
 - использование протоколов, передающих данные в открытом виде (DNS, HTTP, FTP, Telnet, и др.);
 - наличие уязвимости настройки протокола SSL;
 - применение защищенных протоколов передачи данных не в полном объеме.
- Также существует характерная тенденция увеличения данных, передаваемых протоколами DNS/DNSSEC.

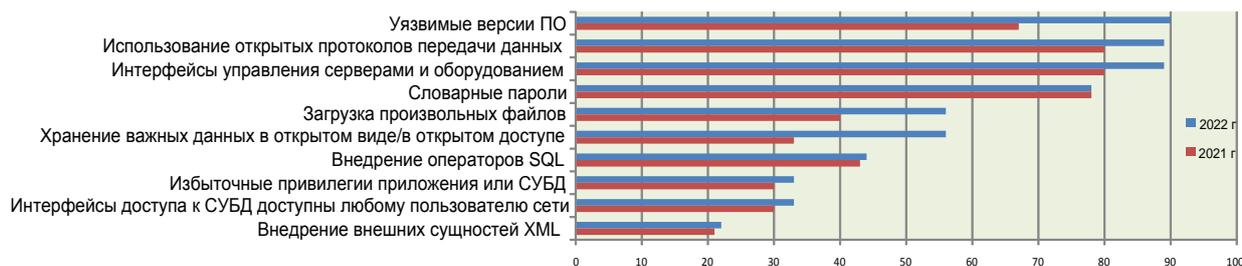


Рис. 2. Наиболее распространенные уязвимости оборудования сетевого периметра

Результаты анализа проведенных КА с использованием ВПО [3–5] показывают (табл. 1), что для выполнения деструктивных действий вредоносной программе необходимо взаимодействие с серверами Command&Control (C&C). При этом следует учесть, что сетевые средства защиты информации, такие как межсетевые экраны, средства антивирусной защиты, системы обнаружения и предотвращения вторжений, никак не идентифицируют действия ВПО, так как для преодоления их зараженная машина связывается с сервером C&C с помощью элементов сетевых протоколов. В качестве одного из основных злоумышленники [6, 7] используют протокол системы доменных имен – DNS, что позволяет им не только обеспечить соединение, но и управлять несанкционированным доступом к данным и их получением посредством перенаправления сетевого трафика. Элементы протокола DNS (ресурсные запи-

си) могут быть использованы в виде туннеля для отправки данных с «зараженного» узла, а также получения команд от центра управления. В качестве способов реализации используются различные типы DNS-запросов, в основном А, CNAME, TXT. Все команды и действия будут «маскироваться» в протокол DNS, и единственное, что выдаст атакующего – большое число таких запросов в сети. В результате подобное туннелирование позволяет обойти защиту организации. Также сетевая служба DNS подходит для масштабирования и засекречивания сетевой инфраструктуры нарушителей.

Таблица 1

Использование службы DNS при проведении КА с ВПО

Наименование ВПО	DNS	Сервера C&C
Locky	✓	✓
SamSam		
TeslaCrypt	✓	✓
CryptoWall	✓	✓
TorrentLocker	✓	✓
PadCrypt	✓	✓
CTB-Locker	✓	✓
FAKBEN	✓	✓
PayCrypt	✓	✓
KeyRanger	✓	✓

В то же время, применение различных сетевых протоколов (HTTP, FTP, SMTP и т. д.) для доставки вредоносных программ злоумышленниками не уменьшает значимости DNS, так как они все используют его внутри себя [6, 7].

Таким образом, сервисы доменных имен (СДИ) являются одними из часто эксплуатируемых сетевых сервисов при проведении компьютерных атак с реализацией ВПО.

МОДЕЛЬ МОНИТОРИНГА DNS-ТРАФИКА В ЗАДАЧАХ РАССЛЕДОВАНИЯ КОМПЬЮТЕРНЫХ ИНЦИДЕНТОВ, НАПРАВЛЕННЫХ НА ОБНАРУЖЕНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ВРЕДНОСНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

СДИ устроен по принципу распределенной базы данных (по иерархии от верхних уровней к низшим), которая распределена среди различных DNS-серверов [8, 9]. Во главе находятся корневые DNS-сервера, которые хранят ссылки на DNS-сервера нижестоящих уровней, содержащие информацию о зонах соответствующих уровней. Распределенная БД содержит данные пространства сегментов/областей в интересах DNS-сервера и DNS-клиента. Таким образом, СДИ обеспечивает доступ пользователей (DNS-клиентов) к информационным ресурсам, т. е. преобразовывает доменные имена в соответствующий числовой адрес (IP).

Анализ целей применения технологий мониторинга DNS-трафика [10, 11] позволил построить модель мониторинга DNS-трафика в условиях зараженности ВПО целевого хоста (рис. 3), которая показывает, что злоумышленник использует протокол DNS в качестве канала передачи информации о доступности и функционирующих сервисах элементов инфраструктуры «жертвы». В связи с этим для «невидимого» использования служб доменных имен и элементов веб-службы (формирования DNS- и HTTP-запросов) злоумышленники создают необходимые серверные мощности, арендуя облачные платформы для построения виртуальной инфраструктуры. Это позволяет злоумышленникам организовывать скрытый канал пе-

редачи данных сигналов управления ВПО, не компрометируя сетевую инфраструктуру, иметь свои серверные мощности и специальные механизмы формирования и регистрации доменных имен для эффективного использования особенностей функционирования службы DNS в «Интернет», а также мониторить в онлайн-режиме доступность определенных сервисов целевой инфраструктуры.

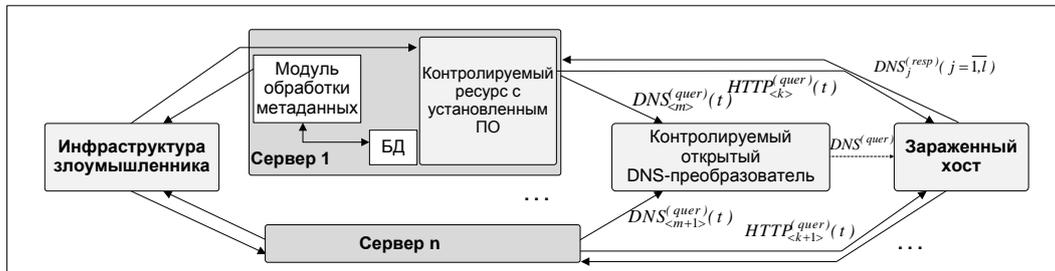


Рис. 3. Модель мониторинга DNS-трафика в условиях зараженности ВПО целевого хоста

Используя модель мониторинга DNS-трафика в условиях зараженности ВПО целевого хоста, рассмотрим схему установления взаимодействия ВПО с сервером, контролируемым злоумышленником (рис. 4).

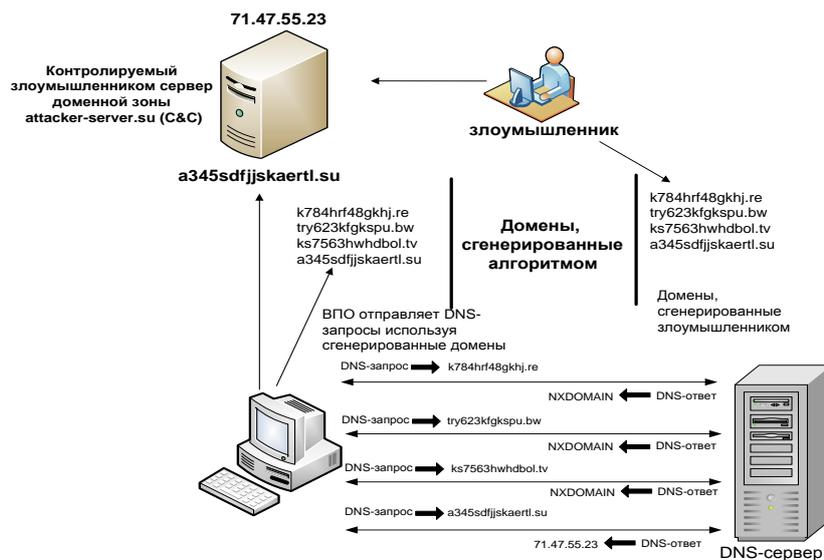


Рис. 4. Установление взаимодействия зараженной машины с сервером C&C

На схеме видно, что при подготовке к проведению компьютерной атаки злоумышленник генерирует домены с использованием специального механизма Domain Generation Algorithm с известным SEED. С другой стороны, в тот же момент вредоносному файлу также необходим SEED для инициализации генератора псевдослучайных чисел. В качестве SEED может выступать любой параметр, который будет известен вредоносному файлу и злоумышленнику (значение текущей даты, времени и т. д.). Тем самым, используя одинаковые векторы инициализации, вредоносный файл и злоумышленник получают идентичные таблицы доменных имен. После этого атакующему достаточно зарегистрировать лишь один домен для того, чтобы вредоносный файл, рекурсивно посылая запросы к DNS-серверу, получил IP-адрес управляющего сервера (после получения ответов о том, что предыдущих доменов не существует – NXDOMAIN) для дальнейшей установки с ним соединения.

Имеются в активе злоумышленников и другие способы использования службы DNS. Например, один из таких способов заключается в создании рекурсивного запроса к домену 3-

го и ниже уровней, в котором в виде поддомена передаются заданные сведения, при этом домен 2-го уровня должен принадлежать атакующему (рис. 5,а). Соответственно, злоумышленник может принимать эти сообщения, контролируя DNS-сервер для домена attacker-server.su. Данный механизм прост за счет использования децентрализации и пропуска трафика фаерволами (обычный DNS-трафик) и системами обнаружения и предупреждения вторжений. Как правило, злоумышленнику необходим работающий авторитативный NameServer, обслуживающий домен. Следовательно «полезная» нагрузка кодируется и зашифровывается на уровне субдомена.

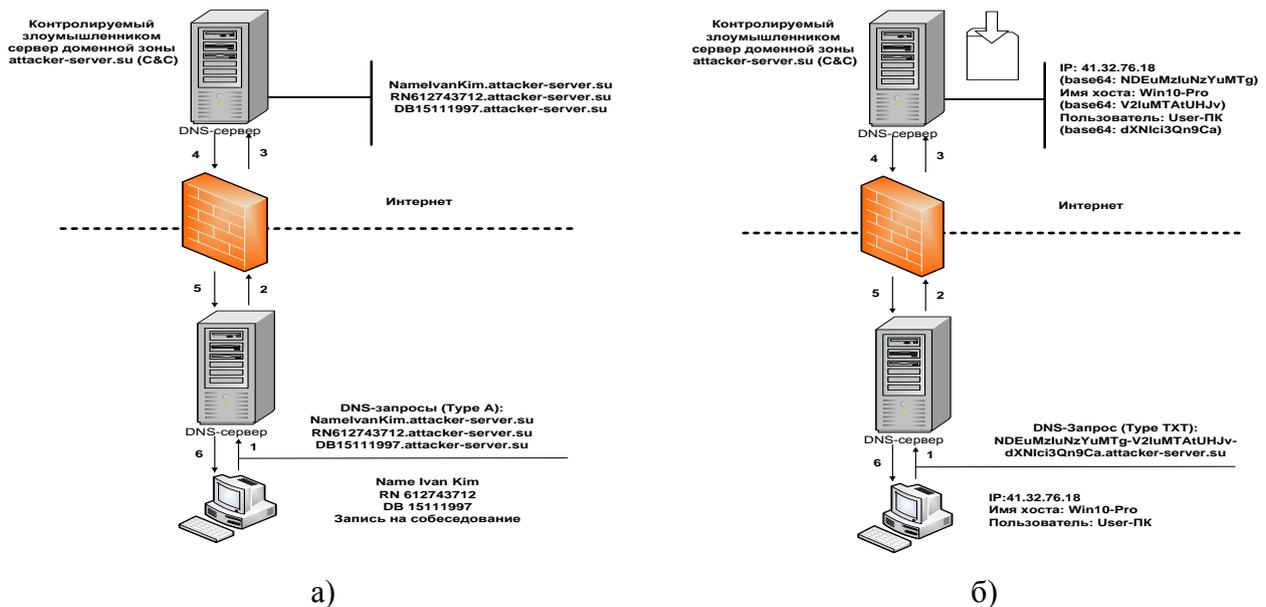


Рис. 5. Схема функционирования сетевой службы DNS:

а – реализация рекурсивного запроса к домену третьего уровня; б – использование службы DNS с ответом типа TXT в формате base64

Также протокол DNS может быть использован злоумышленником при пересылке команд. Атакующие могут покомпонентно загружать шелл-код ВПО с помощью ресурсных записей, в которые вводится код скрипта на основе данных, полученных от ВПО (рис. 5,б).

Шаги по получению и загрузке вредоносного скрипта:

- ВПО отправляет запросы на подконтрольный сервер;
- DNS-ответы передаются в виде нескольких частей TXT-записей;
- ВПО после получения ответа переформатирует код в исходный вид;
- далее скрипт собирается воедино и выполняет запрограммированные действия.

Следовательно, если учесть данные схемы использования DNS-службы при функционировании ВПО, то на основе разработанной модели (табл. 2) возможно определить ассоциируемые источники мониторинга с учетом результатов фильтрации параметров сетевого трафика (ПСТ).

Таблица 2

Источники мониторинга

№	Источник мониторинга	Обозначение	Множество
1	Локальный DNS-сервер/невалидирующий StubResolver	D_l	$\{D^{(1)}\}$
2	Пограничный (кэширующий) DNS-сервер	D_b	$\{D^{(2)}\}$
3	Веб-браузер сетевого объекта (данные кэша браузера)	U_0	$\{U^{(1)}\}$

На основе построенной модели мониторинга DNS-трафика в условиях зараженности ВПО целевого хоста и рассмотренных особенностей клиент-серверного взаимодействия (источники мониторинга), целесообразно выделить в отдельные классы модели на основе иерархической доменной системы (протоколов DNS/DNSSEC) и децентрализованные распределенные системы (DNS Curve/GNU) (табл. 3).

Таблица 3

Идентифицируемые параметры моделей представления сетевого трафика СДИ

Параметр	Значение	Описание	
<i>R</i>	<i>R</i> ₁	www.example.com?	Пользовательские запросы на получение IP-адреса доменного имени
	<i>R</i> ₂	NS com?	
	<i>R</i> ₃	example.com?	
<i>NS</i>	<i>NS</i> ₁	a.gtld-servers.net.	Запись делегированной зоны DNS
	<i>NS</i> ₂	a.iana-servers.net.	
	<i>NS</i> ₃	a.gtld-servers.net.test	
	<i>NS</i> ₄	uz5...hyw.iana-servers.net	
<i>A</i>	<i>A</i> ₁	92.181.211.124	Адресная IPv4-/ IPv6-запись в DNS
	<i>A</i> ₂	92.181.211.89	
<i>RR</i>	<i>RR</i> ₁	example.com. K0rp9n...	Сигнатура ресурсной записи в DNS
	<i>RR</i> ₂	com. U/ZW6P3c...	
	<i>RR</i> ₃	..S4LXnQiBS...	
<i>DS</i>	<i>DS</i> ₁	E2D3C9....	Идентификаторы разрешения проверки подлинности открытых ключей дочерних зон
	<i>DS</i> ₂	3490A6....	

Таким образом, исследование состояний процессов субъектно-объектного взаимодействия трафика СДИ позволило выделить следующие параметры (рис. 6):

$par^{DName^{src}}$ – доменное имя источника;

$par^{DName^{dst}}$ – доменное имя назначения;

$par^{IP^{src}}$ – IP-адрес источника;

$par^{IP^{dst}}$ – IP-адрес назначения;

$par^{Pt^{src}}$ – TCP/UDP-порт источника;

$par^{Pt^{dst}}$ – TCP/UDP-порт назначения;

$par^{PO^{src}}$ – программное обеспечение источника;

$par^{PO^{dst}}$ – программное обеспечение назначения;

$par^{TTL^{DNS}}$ – временной интервал хранения доменной записи в кэше DNS-сервера;

$par^{t_{Quer}}$ – временная метка отправки DNS-запроса;

$par^{t_{Resp}}$ – временная метка получения DNS-ответа;

$par^{IP^{DName}}$ – IP-адрес домена;

par^{NS} – данные о сервере имен (IP-адрес, доменное имя);

$par^{zone^{refr}}$ – период обновления доменной зоны;

$par^{zone^{minTTL}}$ – нижняя граница TTL для доменных записей зоны;

$par^{type_{DNS}}$ – тип DNS-сервера;

$par^{DNS^{contr}}$ – контрагенты DNS-сервера;

$par^{type_{Quer}}$ – тип DNS-запроса;

$par^{DName^{child}}$ – поддомены;

par^{AS} – номер автономной системы.

При этом неспецифичными параметрами являются ПСТ, извлекаемые из стандартных дампов трафика в процессе мониторинга.

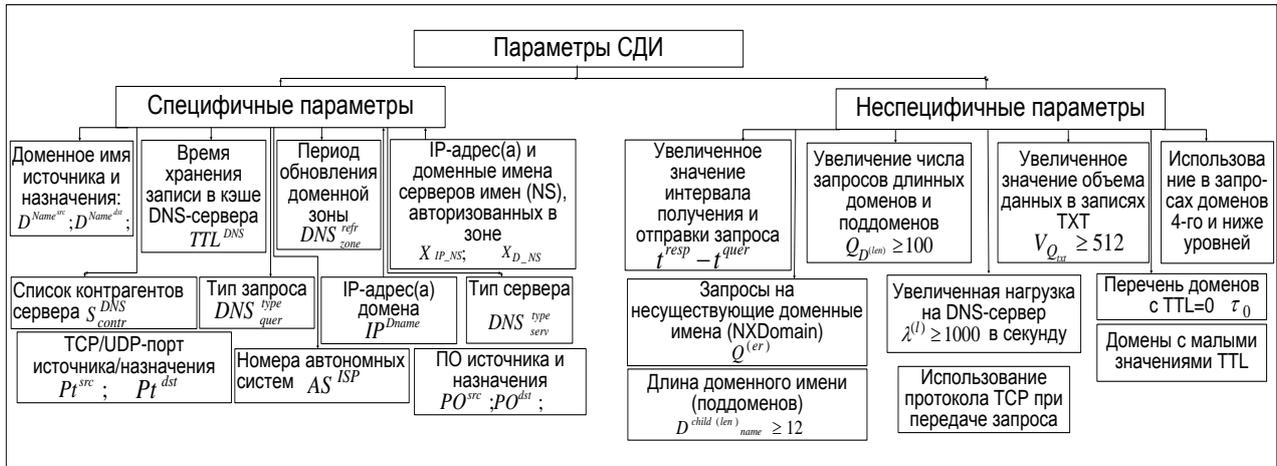


Рис. 6. Классификация параметров, характеризующих особенности DNS-взаимодействия

Таким образом, с учетом параметров, выявленных в результате функционирования модели мониторинга DNS-трафика, для правильного и достоверного установления реального профиля сетевого объекта необходима разработка математического решения, существенно повышающего разрешающую способность профилирования, т.е. увеличивающего «чувствительность» критерия выбора или решающего правила принадлежности состояния сетевого объекта к предварительному профилю (сформированному на основе технологий первичной обработки сетевого трафика), который может оказаться реальным.

С учетом специфики DNS-трафика была выработана стратегия, в соответствии с которой при наличии информативных параметров и отсутствии пересечения областей профилей при диагностировании используются методы на основе детерминированного подхода, а при наличии, кроме информативных параметров, случайной составляющей (помех) – методы вероятностно-статистического подхода. В различных условиях информационной обстановки к значительному пересечению областей профилей (состояний) сетевых объектов мониторинга могут приводить два обстоятельства:

- 1) значительные помехи при определившихся информативных параметрах;
- 2) наличие неспецифичных параметров, превалирование случайной составляющей исследуемых процессов (отсутствие (недостаток) информативных признаков (параметров)).

Изменения неспецифичных ПСТ СДИ целевых объектов могут быть вызваны несовместными событиями – как уязвимостями ПО DNS-сервера, так и ошибок в настройке конфигурации DNS-ресурсов.

Наличие неспецифичных параметров предполагает существенные пересечения областей профилей сетевого объекта мониторинга из множества его возможных известных состояний.

Учет неспецифичных параметров (по полученным значениям параметров) позволит выявлять признаки использования СДИ злоумышленником для установления связи с ВПО и тем самым предоставит возможность получения результативного решения задачи проактивной защиты информационно-телекоммуникационной сети (ИТКС).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Служба DNS является мощным инструментом, используемым практически везде, позволяющим приложениям и системам осуществлять поиск ресурсов и служб, с которыми возможно взаимодействие. Она обеспечивает коммуникационную основу для функционирования

ния более высокоуровневых и мощных протоколов. Но в тоже время администраторы безопасности уделяют недостаточно внимания данному сервису с точки зрения обеспечения безопасности, особенно если учесть, сколько вредоносных программ доставляется в том числе и по протоколам электронной почты или загружается из глобальной вычислительной сети Интернет с использованием HTTP. По этим причинам DNS является идеальным выбором для злоумышленников, оставаясь всегда открытым, часто игнорируемым и, вероятно, недооцененным протоколом для использования при обмене данными со скомпрометированными хостами.

В статье рассмотрен подход, с помощью которого организации могут защитить себя от туннелирования DNS (использованием типов ресурсных записей TXT, CNAME, MX) множеством различных способов, но при этом необходимо учитывать основные индикаторы подозрительной активности в трафике СДИ:

- использование стороннего DNS-сервера при разрешении доменных имен;
- использование конечными узлами редко используемых типов запросов;
- «нетипичный» объем ответов при поиске указанных поддоменов;
- огромное число DNS-запросов различных доменов 3-го и 4-го уровней;
- существование DNS-запросов без ответов;
- минимальный период времени хранения доменной записи в кэше DNS-сервера;
- существование нескольких IP-адресов у домена;
- DNS-запросы с ответами NXDOMAIN.

Данные параметры необходимы при конфигурировании средств защиты информации – средств антивирусной защиты, межсетевого экрана, систем обнаружения и предотвращения атак (IDS/IPS), центра управления событиями безопасности (SIEM). Также следует учесть ряд рекомендаций, касающихся активности злоумышленников, при использовании службы DNS:

- блокировку доменных имен (или IP-адресов) на основе известной репутации или предполагаемой опасности;
- правила, касающиеся полезной нагрузки DNS-запроса;
- правила, регулирующие длину, тип или размер как исходящих, так и входящих DNS-запросов;
- общую защиту клиентских операционных систем с учетом особенностей разрешения имен, а также определенный порядок (рекурсивный или итеративный) их поиска;
- учет поведения пользователей и системы, которая автоматически выявляет аномалии, такие как доступ к новым доменам, особенно когда метод доступа и частота являются нестандартными.

Список используемых источников

1. Природа инцидентов информационной безопасности : отчет за 2022 год. – URL: <https://securelist.ru/kaspersky-incident-response-report-2022/107406> (дата обращения: 15.05.2024).
2. Актуальные киберугрозы: IV квартал 2023 года. – URL: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/cybersecurity-threatscape-2023-q4/> (дата обращения: 15.05.2024).
3. Тренды фишинговых атак на организации в 2022–2023 годах. – URL: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/phishing-attacks-on-organizations-in-2022-2023/> (дата обращения: 15.05.2024).
4. Актуальные киберугрозы. – URL: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/cybersecurity-threatscape> (дата обращения: 15.05.2024).
5. Атака на локальные сети из интернета через перепривязку DNS. – URL: <https://www.securitylab.ru/analytics/499265.php?R=1> (дата обращения: 15.05.2024).

6. *Данилов В. В., Бугаев И. А.* Методика выявления скрытного канала передачи данных на основе идентификации состояний сетевого взаимодействия с учетом особенностей функционирования службы DNS // Вопросы оборонной техники. Сер. 16: Технические средства противодействия терроризму. – 2023. – Вып. 185-186. – С. 54–60.
7. Что такое перехват DNS-запросов? – URL: <https://www.kaspersky.ru/resource-center/definitions/what-is-dns-hijacking> (дата обращения: 15.05.2024).
8. RFC 1033. – URL: <https://www.ietf.org/rfc/rfc1033.txt> (дата обращения: 15.05.2024).
9. RFC 4033. – URL: <https://www.ietf.org/rfc/rfc4033.txt> (дата обращения: 15.05.2024).
10. *Данилов В. В., Овчаров В. А.* Модель угроз безопасности сетевой службы доменных имен при реализации атакующих сценариев // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. – 2021. – № 2. – С. 65–74.
11. *Миллс М.* Типы атак на DNS-серверы: как они работают и как защитить себя. – URL: <https://itigic.com/ru/types-of-attacks-on-dns-servers-how-they-work/> (дата обращения: 15.05.2024).

Е. В. Егоров;
В. А. Овчаров,
доктор технических наук

ТЕХНОЛОГИЯ ПАССИВНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ВРЕДНОСНОГО DOS-ТРАФИКА В ЗАДАЧАХ РАССЛЕДОВАНИЯ ИНЦИДЕНТОВ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Разработана и программно реализована технология идентификации вредоносного DoS-трафика в задачах расследования инцидентов информационной безопасности (ИБ) в условиях проведения атак типа «отказ в обслуживании», основанных на усилении и отражении трафика. Рассмотрены и обоснованы подходы по противодействию данной вредоносной активности.

Ключевые слова: информационная безопасность, сетевой трафик, DoS-атака, инцидент ИБ, IP, DHCP, ICMP.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время при расследовании инцидентов ИБ важнейшее значение имеет эффективность применяемых технологий анализа сетевого трафика. При использовании данных технологий осуществляются сбор и обработка исходящей информации от активных узлов сети, анализ активных соединений, используемых протоколов, портов, взаимодействующих операционных систем и др.

Инцидент информационной безопасности – это событие в ИБ, повлекшее за собой нарушение работоспособности информационно-телекоммуникационной сети путем обхода систем защиты. Наиболее распространенным типом атак в настоящее время являются DoS-атаки, которые могут приводить к сбою в работе серверов или временному выводу из строя всей информационной сети [1].

Нарушители используют DoS-атаки по нескольким причинам [2], таким как:

- проведение DoS-атак на веб-ресурсы с целью шантажа;
- конкурирующие компании или отдельные нарушители могут использовать DoS-атаки для нанесения ущерба конкурентам; например, атаки на веб-сайты конкурентов могут вызвать недоступность услуг;
- политические или идеологические мотивы; нарушители могут использовать DoS-атаки для выражения политических или идеологических убеждений;
- нарушители проводят DoS-атаки для собственного развлечения, вызова или демонстрации навыков.

При расследовании инцидентов информационной безопасности могут преследоваться разные цели, но основной из них является анализ произошедшего инцидента и принятие соответствующих мер для его будущего недопущения. Так как единой методики не существует, в работе предложено и программно реализовано использование технологии пассивного анализа сетевого трафика в качестве инструмента анализа инцидента ИБ для выявления различных DoS-атак в программном комплексе мониторинга и профилирования участников информационного обмена.

Целью публикации статьи является представление комплексного подхода, обеспечивающего наиболее точное обнаружение DoS-атак за счет комбинации существующих и новых параметров (техник) в области пассивного анализа сетевого трафика, с возможностью предоставления числовых оценок трафика. В частности, в статье предлагается проанализировать структуру (поля) пакета: определить размер пакета, соответствующего конкретному протоко-

лу, выявить необычные пульсации в трафике, сформировать базу данных известных производителей устройств, определить нормальное количество подконтрольных устройств в сети.

Предложенный подход является более эффективным по нескольким причинам:

- использование мультифакторного подхода повышает надежность обнаружения атак, так как анализ различных аспектов сетевого трафика позволяет выявить аномалии с большей точностью;
- учет MAC-адресов устройств помогает идентифицировать подозрительные или поддельные устройства;
- выявляются манипуляции с размером сетевых пакетов;
- определяются количество устройств и пакетов в сетевом взаимодействии для принятия мер по защите сети;
- представляются числовые оценки пульсаций трафика, что может привести к разработке более эффективных и инновационных методов защиты от таких угроз.

Существующие методы обычно используют различные подходы для анализа увеличения нагрузки на сеть в контексте обнаружения DoS-атак. Некоторые методы могут базироваться на знаниях, используя собранную информацию о предыдущих атаках и известных слабостях компьютерных систем. Например, популярные системы обнаружения и предотвращения вторжений Snort [3] и Zeek [4] используют известные правила, условия и сигнатуры, что делает их менее эффективными при обнаружении новых или модифицированных атак, которые могут быть изменены, чтобы избежать срабатывания существующих правил, особенно в сетях с высоким уровнем трафика или в сложных сетевых средах [5]. Другие методы могут включать в себя мониторинг сетевых ресурсов, анализ частоты сетевых запросов в общем объеме передаваемых данных, использование пропускной способности процессора, и выявление аномалий в их использовании, например, ПО Suricata [6]. Однако большинство применяемых в настоящее время методов обнаружения DoS-атак не предполагают использование числовых оценок трафика.

В работе [7] был проведен анализ существующих систем обнаружения вторжений. В результате исследования выяснилось, что наблюдается значительная потребность в универсальной и общедоступной системе обнаружения атак, которая могла бы автоматически адаптироваться к новым, неизвестным угрозам в реальном времени. Большинство исследуемых методов обнаружения вторжений не способны самостоятельно распознавать неизвестные атаки, пока они не будут явно описаны в базе знаний системы.

Разработанный модуль в программном комплексе мониторинга и профилирования участников информационного обмена, в общем сравнении с системами обнаружения вторжений в реальном времени, является более исследовательским и ориентированным на предоставление числовых характеристик атакованного трафика, что может быть полезно для анализа и изучения новых видов угроз и атак, а также адаптации к конкретным требованиям и особенностям сетевой среды.

Блок-схема технологии пассивной идентификации вредоносного DoS-трафика представлена на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что сначала происходит загрузка дампа трафика в программный комплекс мониторинга и профилирования участников информационного обмена. Затем специальные модули комплекса проводят разбор загруженного трафика по пакетам с указанием всех полей и параметров. Далее из общего количества данных отбираются необходимые параметры пакета, подготавливаются и загружаются в специальный модуль обнаружения атак типа «Отказ в обслуживании» для дальнейшей обработки. Данный модуль проводит сравнительный анализ поступившей информации с правилами, которые предварительно разработаны и загружены в базу данных. После проверки результаты работы программы выводятся пользователю на экран.



Рис. 1. Блок-схема технологии идентификации вредоносного DoS-трафика

ОБНАРУЖЕНИЕ DOS-АТАКИ С ПОДМЕНОЙ ВЕРСИИ ПРОТОКОЛА IP

Нарушители в процессе атаки могут указывать несуществующую версию IP-протокола (например, версию 0) в отправляемых пакетах, чтобы обойти системы безопасности и снизить вероятность обнаружения своих действий. С помощью данной атаки появляется возможность замаскировать вредоносную деятельность, так как системы мониторинга и безопасности могут не распознать такие пакеты. Это может помочь им избежать обнаружения и увеличить шансы на успешную реализацию кибератаки.

Несуществующая версия IP-протокола может создать проблемы для системы обработки пакетов, так как она не имеет определенных правил для ее обработки. Это может привести к тому, что система не будет знать, как обрабатывать пакеты с такой версией протокола, и они могут быть в лучшем случае просто отброшены, а в худшем – способны замедлить работу активного сетевого оборудования или вывести его из строя. Кроме того, нарушители могут использовать несуществующую версию IP-протокола в качестве части атак, нацеленных на переполнение буфера, чтобы получить удаленный доступ к системе.

С помощью различных инструментов и утилит для создания пакетов вручную нарушитель может проводить генерацию модифицированных пакетов путем подмены различных параметров в полях IP-протокола. Данный способ может использоваться и в качестве нагрузочного тестирования сетевого оборудования. Таким параметром является версия IP-протокола. Согласно структуре заголовка IP-пакета, первые 4 бита указывают на версию IP. В настоящее время официально приняты биты 0100 и 0110, указывающие на 4-ю и 6-ю версии соответственно.

С использованием интерактивной библиотеки Scapy [8] нарушитель может генерировать, отправлять и принимать различные пакеты существующих протоколов, а также заниматься их модификацией путем изменения полей. При генерации пакета в Scapy пользователю необходимо указать некоторые параметры отправляемых пакетов, например: протоколы, MAC-адреса отправителя и получателя, IP-адреса отправителя и получателя, версии протоколов и многое другое.

Для демонстрации уязвимости, связанной с подменой версии IP, можно создать простой пакет, указав альтернативную версию IP в поле IP (рис. 2).

```
from scapy.all import *
ip = IP(version=3, dst='192.168.1.1', src='192.168.1.1')
packet = ip
while(True):
    send(packet)
```

Рис. 2. Генерация и отправка модифицированного пакета с указанием версии IP

На рис. 2 представлен фрагмент кода генерации пакета. В поле IP кроме версии необходимо указать адрес отправителя и получателя. Далее происходит бесконечное заикливание отправляемых пакетов до тех пор, пока маршрутизатор или не заблокирует входящий трафик, или не замедлит свою работу, вплоть до выхода из строя. Данная атака хорошо определяется современными средствами анализа и обработки сетевого трафика. Например, компьютерная программа Wireshark при обработке подобных пакетов подчеркивает межсетевой уровень стека протоколов TCP/IP соответствующим цветом.

В программном комплексе мониторинга и профилирования участников информационного обмена разработан модуль обнаружения атаки подмены версии IP. Для этого принятый пакет разбирается по уровням до IP и далее происходит проверка первых четырех битов, отвечающих за версию IP – 0100 для IPv4 и 0110 для IPv6 соответственно. В случае выявления другой последовательности бит и неоднократного обнаружения подобных пакетов, расследуемый дамп трафика считается вредоносным.

Разработанный модуль активен при пассивном анализе сетевого трафика и внедрен в отдельную вкладку «Экспресс профиль». Основной функционал представляет из себя специальный список «Статистика принятых пакетов» с указанием точного числа принятых пакетов. В нем перечислены некоторые основные протоколы, такие как ARP, IPv4 и IPv6. Остальные протоколы записываются в поле SERVICE. Напротив каждой записи указано число обнаруженных пакетов протокола. На рис. 3 представлена вкладка «Экспресс профиль» со списком «Статистика принятых пакетов».

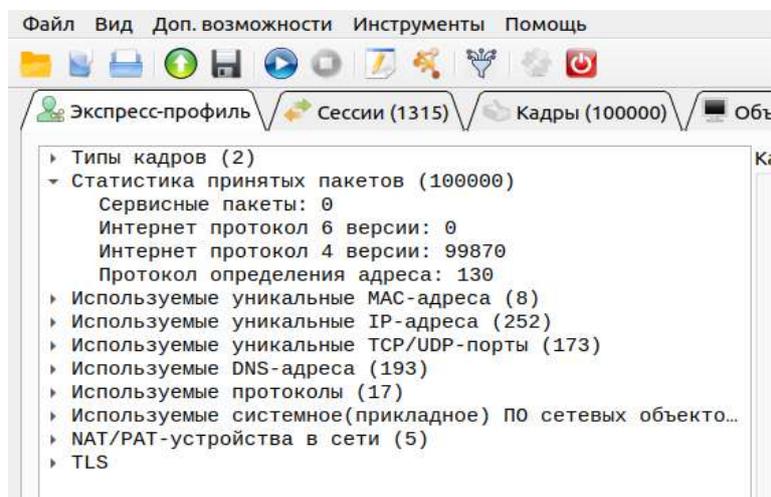


Рис. 3. Вкладка «Экспресс профиль» со списком «Статистика принятых пакетов»

Также при обнаружении подозрительных пакетов, которые потенциально могут быть связаны с различного рода проводимыми атаками, появляется дополнительный список «Пакеты, используемые для проведения атак». На рис. 4 представлен подробный список, раскрывающий тип атаки и число пакетов, используемых для ее осуществления.

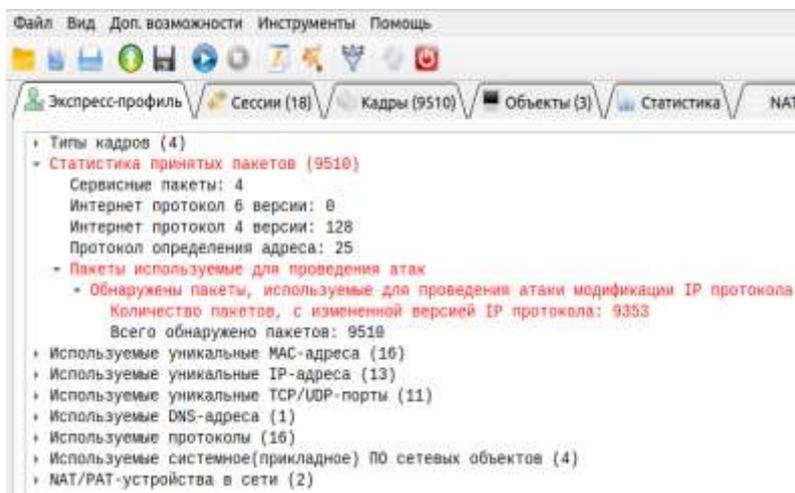


Рис. 4. Обнаружение атаки неопознанной версии IP-протокола в списке «Пакеты, используемые для проведения атак»

Разработанный программный модуль информирует оператора при обнаружении подозрительных пакетов, связанных с проведением атаки подмены версии IP-протокола, которая может негативно повлиять на работоспособность информационной сети и активного сетевого оборудования.

ОБНАРУЖЕНИЕ АТАКИ – ИСЧЕРПАНИЯ ПУЛА DHCP-АДРЕСОВ

Актуальность DoS-атак, связанных с исчерпанием пула DHCP, неуклонно повышается. Полномасштабная атака, связанная с DHCP-поток, состоит из двух этапов.

Первый этап – это атака на DHCP-сервер, связанная с исчерпанием пула свободных IP-адресов (DHCP starvation attack) и, тем самым, выводом его из строя.

Второй этап – внедрение и настройка нелегитимного DHCP-сервера, с помощью которого нарушитель может начать раздавать IP-адреса и другие параметры конфигурации TCP/IP сетевым DHCP-клиентам (DHCP spoofing attack). Включаемые параметры будут содержать DNS-сервер и IP-адрес шлюза по умолчанию. С помощью подменного DNS-сервера появляется возможность перенаправить трафик конечного пользователя на поддельные, фишинговые сайты, а IP-адрес шлюза может представлять из себя компьютер нарушителя, что заставит сетевых клиентов отправлять трафик, предназначенный для внешних сетей, к себе на устройство. На данном этапе нарушитель может проводить захват конфиденциальных пользовательских данных и организовать атаку «Человек посередине» [9].

Подобная атака определяется при обнаружении подозрительно большого числа широковещательных DHCP-запросов (DHCP_REQUEST или DHCP_DISCOVER) для обнаружения DHCP-сервера в сети от клиентов с поддельными исходными MAC-адресами. В таком случае сервер на каждый подобный запрос выделяет и резервирует IP-адрес. Данный трафик считается аномальным и количество устройств зависит от ряда факторов, к которым относятся:

- размер сети и количество доступных адресов в пуле DHCP;
- используемый алгоритм распределения адресов DHCP;
- время жизни арендованных адресов DHCP и таймаут их освобождения;

- нормальное количество устройств, которые подключаются к сети;
- частота подключения новых устройств к сети.

В общем случае количество новых подключаемых устройств, которые могут быть аномальными в локальной среде для DHCP-сервера, должно быть ограничено количеством доступных адресов в пуле DHCP и частотой их подключения к сети. Если количество новых устройств существенно превышает норму, это может указывать на атаку исчерпания пула адресов DHCP.

Однако не во всех случаях такая атака способна заполнить полностью пул адресов и может быть обнаружена сервером. Окончание процедуры выделения IP-адреса происходит только после того как DHCP-сервер отправит сообщение DHCP_ACK. В таком случае нарушители используют способ с подменой DHCP relay agent в сети. Когда нарушитель подменяет DHCP relay agent, он может сгенерировать и отправить большое количество фальшивых DHCP-запросов с разных мест в сети, что затрудняет их обнаружение и блокирование, так как подмененный агент может выглядеть как официальный и легитимный.

Обнаружить данный способ атаки возможно в следующих случаях:

- если в DHCP-запросах подмененного DHCP relay agent указан несуществующий MAC-адрес. Данные адреса сетевых устройств уникальны и зарегистрированы в базе данных IEEE;
- если в трафике присутствует большое количество DHCP-запросов с одинаковым или с неправильным форматом MAC-адресов и между запросами подозрительно короткий временной интервал;
- если запросы отправлены с удаленных IP-адресов, которые не могут быть связаны с реальным DHCP relay agent;
- если на DHCP-сервере установлен механизм защиты способный установить лимит на количество адресов, которые может выдать DHCP-сервер одному клиенту, или настроить DHCP snooping для блокировки фальшивых DHCP-запросов.

Для тестирования работоспособности модуля была проведена генерация широкоэмитерного DHCP-пакета с использованием библиотеки Scapy (рис. 5). На рисунке представлен код пакета с использованием функции RandMAC, необходимой для генерации различных MAC-адресов, а также бесконечный цикл отправки пакета.

```
from randmac import RandMac
from scapy.all import BOOTP, DHCP, Ether, IP, UDP, sendp

eth = Ether(src=RandMAC(), dst='ff:ff:ff:ff:ff:ff')
ip = IP(src='0.0.0.0', dst='255.255.255.255')
udp = UDP(sport=68, dport=67)
boot = BOOTP(chaddr=RandMAC())
dhcp = DHCP(options=[("message-type", "discover"), "end"])

packet = eth/ip/udp/boot/dhcp

while(True):
    sendp(packet)
```

Рис. 5. Генерация и отправка модифицированного пакета атаки исчерпания пула адресов DHCP-сервера

В программном комплексе мониторинга и профилирования участников информационного обмена разработан программный модуль, способный определить в сетевом трафике вероятность проведения DoS-атаки путем исчерпания пула адресов по протоколу DHCP, с представленной статистикой.

Анализ обрабатываемого дампа состоит из нескольких нижеприведенных параметров.

1. Оценка коэффициента пульсации трафика. В случае проведения атаки DHCP-DoS, возможно, будет наблюдаться резкий всплеск трафика из-за массовых запросов на выделение IP-адресов от атакующих. С помощью анализатора сетевого трафика Wireshark построены

графики потоков данных. На рис. 6 и 7 представлены интенсивности нормального трафика и трафика, подвергнутого DHCP starvation attack.

В нормальном трафике пакеты разнесены между собой равномерно. Редко наблюдаются ситуации, когда в один момент времени достигается пиковая активность.

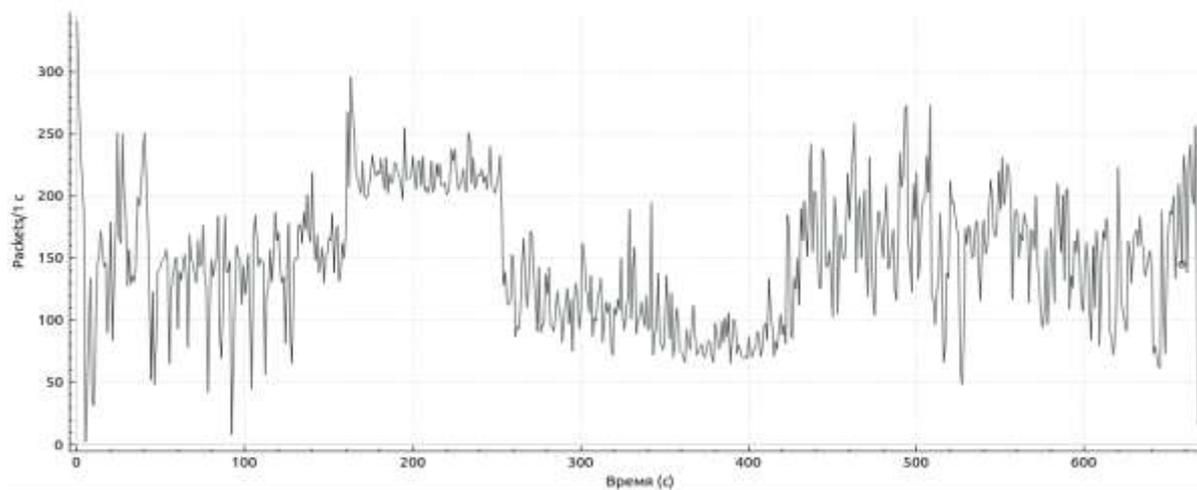


Рис. 6. График нормального сетевого трафика

В атакованном трафике наблюдается непрерывная пиковая активность DHCP-пакетов в интервале с 7-й по 32-ю секунды. Трафик сильно загружен протоколом DHCP. Проводится сравнительный анализ коэффициента пульсации DHCP-трафика с коэффициентом пульсации всего трафика. Оценка коэффициента пульсации помогает определить характер колебаний в объеме трафика.

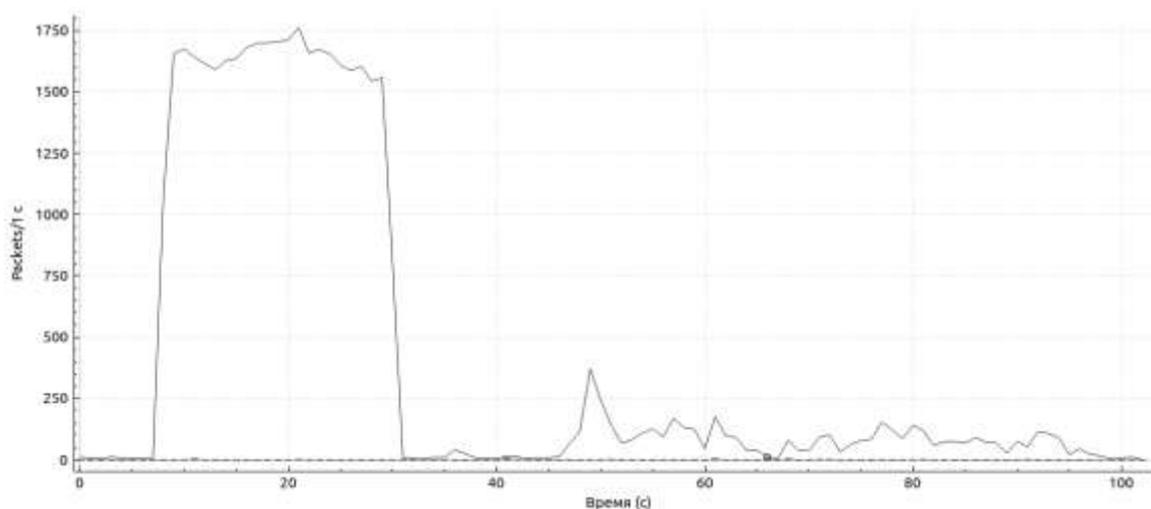


Рис. 7. График атакованного сетевого трафика DHCP-DoS

Коэффициент пульсации трафика рассчитывается по формуле

$$P = \frac{R_{max}}{R_{ave}}, \quad (1)$$

где R_{max} – максимальная скорость трафика за определенный период времени;
 R_{ave} – средняя скорость трафика за определенный период времени.

Скорость трафика рассчитывается по формуле

$$R = \frac{S_b}{\Delta t}, \quad (2)$$

где S_b – размер данных пакета, рассчитанный в битах;
 Δt – временной интервал между каждой парой последовательных пакетов в дампе,
 $t_i - t_{i-1}$.

Скорость вычисляется для каждого временного интервала, а затем определяются максимальная и минимальная скорости во всех полученных значениях.

При известных входных параметрах, мы можем сделать расчет коэффициента пульсации трафика. Пусть SP_{ALL} – набор размеров всех пакетов в трафике, кроме DHCP, ΔT_{ALL} – временная разница между этими пакетами, SP_{DHCP} – набор размеров только DHCP-пакетов, ΔT_{DHCP} – временная разница между DHCP-пакетами. Предположим две простые ситуации.

В первой ситуации сетевой трафик в нормальном состоянии состоит из 10 пакетов, один из которых по протоколу DHCP, с разными размерами в байтах и временными интервалами в секундах:

$$\begin{aligned} SP_{ALL} &= \{450, 470, 450, 250, 250, 200, 470, 200, 450\}; \\ \Delta T_{ALL} &= \{0.01, 0.01, 0.09, 0.01, 0.08, 0.01, 0.01, 0.09, 0.08\}; \\ SP_{DHCP} &= \{290\}; \\ \Delta T_{DHCP} &= \{0.09\}; \end{aligned}$$

Применим формулу (2) для расчета скоростей трафика:

$$\begin{aligned} R_{ALL} &= \{45000, 47000, 5000, 25000, 3125, 20000, 47000, 2222.22, 5625\}; \\ R_{DHCP} &= \{3222.22\}; \end{aligned}$$

Применим формулу (1) для расчета коэффициента пульсации:

$$\begin{aligned} P_{ALL} &= \frac{47000}{20319.44} = 2.31; \\ P_{DHCP} &= \frac{3222.22}{3222.22} = 1. \end{aligned}$$

Проведенные расчеты показывают, что в нормальном трафике коэффициент пульсации всего трафика далек от коэффициента пульсации DHCP-трафика.

Во второй ситуации происходит DHCP-атака. Трафик также состоит из 10 пакетов, но пять из них используются модифицированными для атаки, причем временной интервал будет стремиться к минимальному:

$$\begin{aligned} SP_{ALL} &= \{450, 470, 470, 450, 470\}; \\ \Delta T_{ALL} &= \{0.01, 0.01, 0.08, 0.01, 0.08\}; \\ SP_{DHCP} &= \{240, 240, 240, 240, 240\}; \\ \Delta T_{DHCP} &= \{0.009, 0.005, 0.009, 0.005, 0.009\}; \end{aligned}$$

Применим формулу (2) для расчета скоростей трафика:

$$\begin{aligned} R_{ALL} &= \{45000, 47000, 5875, 45000, 5875\}; \\ R_{DHCP} &= \{26666.66, 48000, 26666.66, 48000, 26666.66\}; \end{aligned}$$

Применим формулу (1) для расчета коэффициента пульсации:

$$P_{ALL} = \frac{48000}{32474.998} = 1.47;$$

$$P_{DHCP} = \frac{48000}{35199.996} = 1.36.$$

Проведенные расчеты показывают, что при проведении атаки коэффициент пульсации вредоносного DHCP-трафика приближается к коэффициенту пульсации всего трафика.

2. Произвести проверку MAC-адресов от DHCP-устройств с таблицей «IEEE OUI (Organizationally Unique Identifier) Lookup», в которой содержится информация об уникальных идентификаторах производителей сетевых устройств. Они представлены первыми тремя октетами (24 битами) MAC-адреса, который является уникальным идентификатором для сетевого интерфейса. В случае отсутствия нужного MAC-адреса в данной таблице, DHCP-устройство может считаться несуществующим и сгенерированным программой.

3. Определение минимального, максимального и среднего размеров DHCP-пакета. В нормальном трафике средний размер пакетов DHCP «Discover» и «Request» составляет диапазон 300–352 байта. При указанном размере содержатся основные данные для запроса адреса IP у DHCP-сервера. При использовании дополнительных опций размер пакета может возрасти до 600 байт, но эти пакеты редки для DHCP «Discover» и «Request».

4. Необходимо четко определить какое количество устройств и пакетов участвуют в сетевом взаимодействии в анализируемом дампе и количество устройств и пакетов, рассылающих DHCP_DISCOVER/DHCP_REQUEST-запросы. Далее рассчитывается процентное соотношение для этих значений. Такой сценарий не всегда может гарантированно констатировать атаку, так как установить четкую границу аномального количества DHCP-устройств для всех дампов трафика не представляется возможным. В разных случаях заранее неизвестно, сколько в локальной сети может одновременно быть подключено новых устройств, а также из-за слишком малого размера дампа может быть дан ложный результат. На рис. 8 представлен результат обнаружения вероятности подобной атаки.

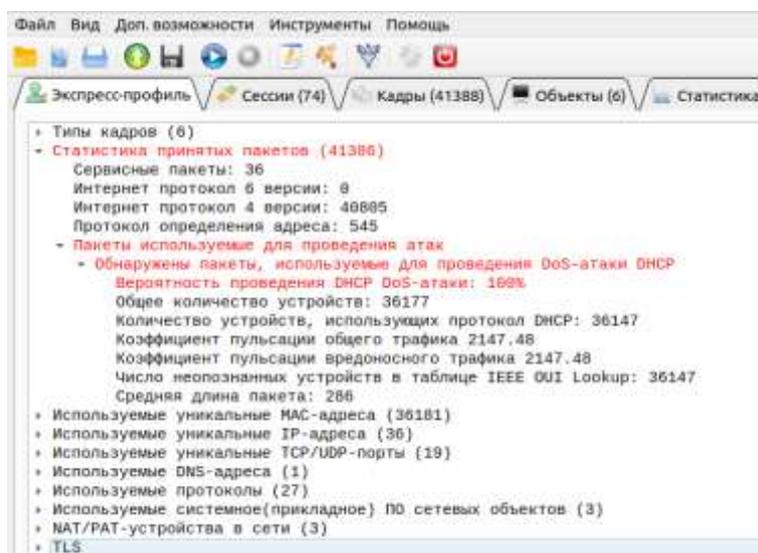


Рис. 8. Обнаружение DoS-атаки с DHCP-протоколом в списке «Обнаружены пакеты, используемые для проведения DoS-атаки DHCP»

Разработанный программный модуль показывает вероятность обнаружения атаки исчерпания пула DHCP-адресов, так как более точный результат зависит от индивидуального подхода к каждому рассматриваемому случаю и зависит от специфики информационной сети.

Анализируя представленные параметры для вычисления числовых характеристик трафика, можно утверждать, что они обеспечивают возможность выявления ранее неизвестных аномалий, которые связаны с DoS-атаками, использующими DHCP-протокол. Это позволяет сде-

лать процесс оценки более эффективным, расширяя способность системы обнаружения атак реагировать на новые угрозы и повышая общий уровень безопасности в сети.

ОБНАРУЖЕНИЕ DOS-АТАК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОТОКОЛА ICMP

Не теряет актуальности проведение DoS-атак (распределенная атака отказом в обслуживании) путем отправки огромного количества запросов или пакетов на целевой сервер или в сеть с помощью протокола ICMP (*Internet Control Message Protocol*). Цели данной атаки не отличаются в значительной степени от рассмотренных ранее – перегрузка ресурсов и вызов проблем в доступности сервисов для легитимных пользователей.

Нарушители специально используют протокол ICMP, так как именно он обычно используется для передачи управляющей информации и сообщений об ошибках в IP-сетях, в том числе эхо-запросов (ping). Одним из способов осуществления DoS-атаки с использованием ICMP является отправка огромного количества эхо-запросов на целевой сервер или сеть. Если сервер не может обработать все эти запросы, это может привести к перегрузке ресурсов и отказу в обслуживании или к серьезным проблемам в обработке легитимного трафика [10].

Проведение DoS-атак с использованием протокола ICMP актуально по нескольким причинам.

1. Широкая поддержка. ICMP является широко распространенным протоколом в сетях и обычно не блокируется на межсетевых экранах (*firewalls*) и других сетевых устройствах. Это делает его привлекательным выбором для нарушителей, так как они могут легче достичь своей цели без дополнительных препятствий.

2. Малый размер пакетов. ICMP-пакеты обычно имеют небольшой размер, что позволяет отправлять их в больших количествах с небольшими затратами по сетевой пропускной способности. Это значит, что нарушители могут создавать большой объем трафика, используя меньшее количество ресурсов и причиняя больший ущерб целевой системе.

3. Подделка адреса и отражение атаки. ICMP-пакеты также могут быть подделаны, что позволяет скрывать свои истинные исходные адреса и использовать адреса других компьютеров в качестве источников атаки. Это создает проблему обратного направления (*backscatter*) и позволяет нарушителям укрываться за «невинными» узлами, которые становятся «отражателями» атаки, что усложняет идентификацию и преследование атакующих.

4. Потенциальная амплификация. ICMP также может быть использован для амплификации DoS-атаки. Это означает, что маленький запрос ICMP может вызывать больший ответ от целевой системы, что увеличивает объем трафика, направленного на цель. Данное обстоятельство может усилить воздействие атаки и увеличить ее разрушительный эффект.

Следует отметить, что сама DoS-атака с использованием ICMP, как правило, не позволяет нарушителю получить контроль над целевым сервером или сетью. Целью такой атаки является временное нарушение доступности и обслуживания для легитимных пользователей, а не проникновение в систему или кража данных.

Например, успешно проведенная атака может вызвать временную недоступность онлайн-сервиса или услуги и привести к потере прибыли и доверия пользователей к компании. Ослабленные сервер или сеть могут создать уязвимость и открыть возможность для проведения дальнейших атак или получения несанкционированного доступа к системе. Успешная DoS-атака может также использоваться в качестве механизма отвлечения внимания команды и администраторов, чтобы провести и скрыть другие виды атак. Для проведения данного типа атаки нарушитель может использовать множество типов ICMP-сообщений, вот основные из них:

- 1) Echo Request (тип 8): в этом типе сообщения отправитель отправляет большое количество запросов хосту-жертве, тем самым перегружая его;

2) Echo Reply (тип 0): при получении сообщения типа Echo Request (тип 8), хост-жертва должен отправить в ответ сообщение типа Echo Reply (тип 0);

3) Redirect (тип 5): это сообщение используется для информирования отправителя о том, что путь для доставки пакета должен быть изменен, тем самым создается избыточный трафик;

4) Timestamp Request (тип 13): в данном типе сообщения отправитель запрашивает у хоста-жертвы текущее время, тем самым создается нагрузка на жертву, вызывая проблемы с ее производительностью;

5) Address Mask Request (тип 17): этот тип сообщения ICMP используется для запроса маски адреса у хоста-жертвы.

Для тестирования работоспособности модуля была проведена генерация широковещательного ICMP-пакета с использованием специальной библиотеки Scapy. На рис. 9 представлен код пакета с использованием функции RandMAC, необходимой для генерации различных MAC-адресов, и бесконечный цикл отправки пакета.

```
1 from randmac import RandMac
2 from scapy.all import ICMP, Ether, IP, sendp
3
4 while(True):
5     eth = Ether(src=RandMac(), dst='ff:ff:ff:ff:ff:ff')
6     ip = IP(src='0.0.0.0', dst='255.255.255.255')
7     icmp = ICMP()
8
9     packet = eth/ip/icmp
10
11     sendp(packet)
```

Рис. 9. Генерация и отправка модифицированного пакета DoS-атаки с помощью протокола ICMP

В программном комплексе мониторинга и профилирования участников информационного обмена разработан программный модуль, способный определить в сетевом трафике вероятность проведения DoS-атаки путем непрерывной передачи в сеть большого числа пакетов протокола ICMP, с представленной статистикой, на основании которой и был сделан вывод.

Анализ обрабатываемого дампа включает несколько этапов.

1. Оценка коэффициента пульсации трафика. В случае проведения атаки ICMP-DoS, возможно, будет наблюдаться резкий всплеск трафика из-за массовых эхо-запросов в сети. На рис. 10 представлен сетевой трафик, построенный с помощью анализатора сетевого трафика Wireshark, со всеми пакетами (черный график) и отфильтрованными пакетами ICMP (красный). Видно, что после первой секунды происходит заметное увеличение числа пакетов ICMP.

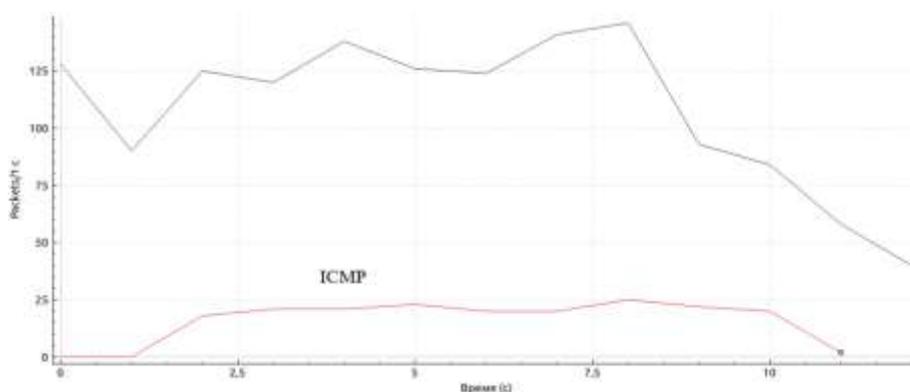


Рис. 10. График сетевого трафика со всеми пакетами (черный) и график с пакетами ICMP (красный)

Проводится сравнительный анализ коэффициента пульсации ICMP-трафика с коэффициентом пульсации всего трафика. Данная оценка помогает определить характер колебаний в объеме трафика. Для этого используются формулы (1) и (2).

2. Произвести проверку MAC-адресов от ICMP-устройств с таблицей «IEEE OUI (Organizationally Unique Identifier) Lookup», в которой содержится информация об уникальных идентификаторах производителей сетевых устройств. Они представлены первыми тремя октетами (24 битами) MAC-адреса, который является уникальным идентификатором для сетевого интерфейса. В случае отсутствия нужного MAC-адреса в данной таблице ICMP-устройство может считаться несуществующим и сгенерированным программой.

3. Необходимо четко определить, сколько всего устройств и пакетов участвуют в сетевом взаимодействии в расследуемом дампе и количество устройств и пакетов, рассылающих ICMP-запросы. Далее проводится расчет процентного соотношения этих значений.

На рис. 11 представлен результат обнаружения вероятности подобной атаки.

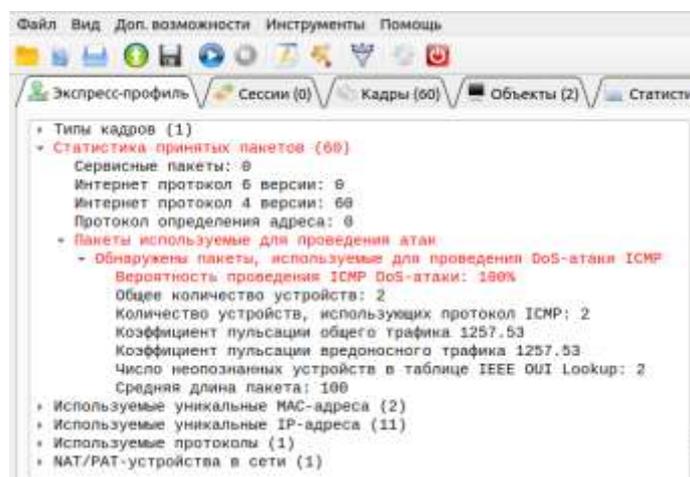


Рис. 11. Обнаружение DoS-атаки с ICMP-протоколом во вкладке «Обнаружены пакеты, используемые для проведения DoS-атаки ICMP»

Данный программный модуль показывает вероятность обнаружения DoS-атаки непрерывной отправки ICMP-запросов, так как более точный результат зависит от индивидуально-го подхода к каждому рассматриваемому случаю и зависит от многих факторов организации сети.

После рассмотрения предложенных параметров для анализа трафика, можно сделать вывод о том, что они обеспечивают возможность выявления непредвиденных аномалий, связанных с DoS-атаками, использующими протокол ICMP. Такой анализ расширяет процесс оценки, делая его более продуктивным и предоставляя инструменты для более эффективной защиты сети от атак и угроз, связанных с этим протоколом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время DoS-атаки являются одним из наиболее распространенных видов инцидентов информационной безопасности. Важно отметить, что проведение DoS-атаки является противозаконным действием в большинстве юрисдикций без разрешения владельца целевой системы. Расследование подобных инцидентов с помощью технологий пассивного анализа сетевого трафика способствует своевременному и качественному развитию средств информационной кибербезопасности.

Одним из таких средств является программный комплекс мониторинга и профилирования участников информационного обмена, в состав которого входят несколько модулей, способных определить присутствие вредоносных пакетов, направленных на проведение DoS-атак. Предложенный подход представляет собой новый и, возможно, более прямолинейный метод для оценки изменений в сетевом трафике. Одной из его главных особенностей является возможность предоставления числовых оценок характеристик трафика, что делает его более объективным и легким в понимании. Этот подход отличается от других методов тем, что он позволяет проводить анализ данных на основе конкретных числовых значений, что делает процесс оценки более объективным и автоматизированным.

Преимущество данного подхода заключается в его масштабируемости. Поскольку числовые оценки могут быть легко обработаны с помощью компьютерных алгоритмов, метод может быть применен к большим объемам сетевого трафика. Это делает его эффективным для обнаружения DoS-атак в крупных сетях, где объемы данных могут быть значительными.

Необходимость в защите от подобных атак актуальна, а подобные инциденты могут привести к серьезным последствиям для информационной сети, к простоям в работе веб-сайтов и онлайн-сервисов, потере данных, нарушению технологических процессов. Большое разнообразие форм и методов атак говорит о высоком уровне востребованности среди нарушителей, что заставляет разрабатывать более гибкие системы мониторинга сетевого трафика, обеспечивающие защиту от разных видов атак.

Список используемых источников

1. Тенденции DDoS-атак в 2022 году. – URL: <https://ddos-guard.net/ru/blog/tendentsii-ddos-atak-2022> (дата обращения: 20.06.2023).
2. Unix и Linux: руководство системного администратора / Трент Уэйли [и др.] : пер. с англ. – 5-е изд. – СПб. : Диалектика, 2020. – 989 с.
3. What is Snort? – URL: <https://www.snort.org/> (дата обращения: 20.06.2023).
4. Zeek Documentation. – URL: <https://docs.zeek.org/en/master/index.html> (дата обращения: 20.06.2023).
5. Багатов А. Р., Смирнов С. И. Актуальность и анализ систем обнаружения и предотвращения вторжений (IDS/IPS) // Цифровая наука. – 2023. – № 9. – С. 21–27.
6. Suricata User Guide. – URL: <https://docs.suricata.io/en/latest/sdfdg> (дата обращения: 20.06.2023).
7. Андреева Я. А., Василевский К. А. Анализ современных систем обнаружения вторжений // Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности. – 2023. Т. 8, № 6(32). – С. 134–141.
8. Welcome to Scapy's documentation! – URL: <https://scapy.readthedocs.io/en/latest/> (дата обращения: 20.06.2023).
9. DHCP Starvation Attack. – URL: <https://www.geeksforgeeks.org/dhcp-starvation-attack/> (дата обращения: 25.06.2023).
10. ICMP Flood DDoS Attack. – URL: <https://www.geeksforgeeks.org/icmp-flood-ddos-attack/> (дата обращения: 25.06.2023).

А. В. Антропова;
 И. А. Ефременков;
 В. В. Козлов,
доктор технических наук, профессор;
 А. В. Лагун,
кандидат технических наук, доцент

МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК ПРИ ПУСКЕ РАКЕТЫ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В статье представлены аналитические способы оценивания тепловых нагрузок при пуске ракет космического назначения. Показаны основные ситуации расчета тепловых нагрузок, к которым отнесены процессы прогрева покрывающего листа газохода, процессы нагрева до уровня плавления стенки газохода, а также прогрева с абляцией покрывающего листа. Представлены способы оценивания параметров теплового нагружения для случаев I, II и III рода граничных условий в задачах нестационарного прогрева стенок газодинамического тракта. Получены новые аналитические соотношения для оценочного инженерного расчета процессов теплового нагружения, характерного для условий пуска ракет космического назначения.

Ключевые слова: пусковое оборудование, пусковые нагрузки, тепловые нагрузки, плавление, абляция, скорость прогрева.

ВВЕДЕНИЕ

Тепловые нагрузки при пуске ракеты космического назначения (РКН) обусловлены тем, что воздействие струи продуктов сгорания двигательной установки (ДУ) первой ступени ракеты на каждом пуске приводит к частичному разрушению конструкции пускового оборудования (ПО).

Развитие двигателестроения для РКН приводит к увеличению тепловых нагрузок с величиной удельных тепловых потоков [1]

$$q = 1 \div 5 \frac{\text{МВт}}{\text{м}^2}$$

и, как следствие, к снижению показателей ресурса для пускового оборудования.

АНАЛИЗ АНАЛИТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ НЕСТАЦИОНАРНОГО НАГРЕВА

Оценивание теплового воздействия струи продуктов сгорания основано на решении уравнения нестационарной теплопроводности. Как правило, уравнение нестационарной теплопроводности для ПО решается в условиях анализа распространения теплового поля в одномерной постановке для бесконечной плоской пластины газохода ПО, имеющей конечную толщину. Такая постановка задачи вполне соответствует физическим процессам пуска РКН.

Как известно, уравнение нестационарной теплопроводности для пластины ПО имеет вид

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где T , t , x , a – температура, время, координата по толщине пластины и температуропроводность соответственно. Температуропроводность, как известно, определяется соотношением

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho},$$

где λ – коэффициент теплопроводности;
 c – теплоемкость материала стенки;
 ρ – плотность материала стенки.

В общем виде сомножители температуропроводности есть нелинейные функции от температуры. Учет изменчивости значения температуропроводности обычно выполняется при численном решении уравнения (1).

Для инженерных оценок процессов нестационарной теплопроводности допустимо решение уравнения (1) при постоянном значении параметра температуропроводности a . При таких ограничениях уравнение (1) записывается в безразмерном виде, путем введения масштабов для всех переменных входящих в него:

– безразмерной температуры

$$\theta = \frac{T - T_{\text{газ}}}{T_0 - T_{\text{газ}}},$$

где $T, T_0, T_{\text{газ}}$ – текущее значение температуры, начальное значение температуры и температура газа продуктов сгорания ДУ РКН соответственно;

– безразмерной толщины стенки

$$X = \frac{x}{\delta},$$

где x, δ – текущая координата и толщина стенки соответственно;

– безразмерного времени

$$Fo = \frac{t}{t_m},$$

где t_m – масштаб для временного параметра, $t_m = \frac{\delta^2}{a}$.

В результате такого масштабирования уравнение (1) принимает вид

$$\frac{\partial \theta}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2}. \quad (2)$$

Уравнение (2) параболического типа. В физическом и вычислительных смыслах это означает, что прогрев в стенке чувствуется мгновенно во всем объеме, но в разной степени. Отсюда следует, что это уравнение принципиально не дает скачков температур.

Для решения уравнения (2) используются различные граничные условия. Так для процессов, где наблюдается абляция с постоянной температурой на поверхности пластины, следует вводить граничное условие I рода [2]:

$$X = X_{\text{плав}}; \theta = \theta_{\text{плав}} = 1,$$

где $X_{\text{плав}}$ – координата плавящейся поверхности.

Для случая, когда внешний тепловой поток не меняется, используется граничное условие II рода:

$$X = 0; \frac{\partial \theta}{\partial X} = -Q.$$

Здесь Q – безразмерный тепловой поток, который определяется выражением

$$Q = \frac{q}{q_m},$$

где q – размерный тепловой поток;

q_m – масштаб для размерного теплового потока.

Для большинства инженерных задач используется граничное условие III рода для внешней стенки, которое задается законом теплообмена между поверхностью пластины и внешним газовым потоком через уравнение конвекции Ньютона:

$$X = 1; \left(\frac{\partial\theta}{\partial X}\right) = -Bi \cdot \theta; Fo > 0,$$

где Bi – безразмерная толщина пластины (число Био),

$$Bi = \frac{\alpha_{\text{газ}} \cdot \delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}}.$$

Здесь $\alpha_{\text{газ}}$ – коэффициент теплопередачи (теплоперехода), который определяется экспериментально;

$\delta_{\text{ст}}$ – толщина пластины;

$\lambda_{\text{ст}}$ – коэффициент теплопроводности пластины.

Для внутренней стенки пластины допустимо использование следующих условий:

$$X = 0; Fo > 0; \frac{\partial\theta}{\partial X} = 0.$$

Для задач с граничными условиями III рода используются следующие начальные условия:

$$Fo = 0; 0 \leq X \leq 1; \theta(Fo, X) = 1.$$

При решении задачи нестационарного нагрева для пластины ПО следует определить значение коэффициента теплопередачи $\alpha_{\text{газ}}$. Величина этого коэффициента для пластины ПО определяется по соотношению

$$\alpha_{\text{газ}} = \frac{Nu \cdot \lambda_{\text{газ}}}{\delta_{\text{тепл}}},$$

где Nu – критерий Нуссельта;

$\lambda_{\text{газ}}$ – коэффициент теплопроводности газа продуктов сгорания ДУ РКН;

$\delta_{\text{тепл}}$ – величина теплового пограничного слоя газа.

Для рассматриваемой задачи теплового нагружения газохода ПО применимо соотношение для определения критерия Нуссельта [3] в виде

$$Nu = 0.0023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4},$$

где Re, Pr – критерий Рейнольдса и критерий Прандтля соответственно.

Для процессов теплового нагружения пластин газоходов ПО значение $\alpha_{\text{газ}}$ находится в диапазоне от 1000 до 3000 Вт/м²К⁰.

Классическое аналитическое решение этой задачи описывается соотношением

$$\theta(Fo, X) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2 \cdot \sin \varepsilon_i}{\varepsilon_i + \sin \varepsilon_i \cdot \cos \varepsilon_i} \cos(\varepsilon_i X) \cdot \exp(-\varepsilon_i^2 \cdot Fo), \quad (3)$$

где ε_i – корни трансцендентного уравнения $\text{ctg} \varepsilon = \varepsilon / Bi$.

Типичные зависимости изменения теплового поля для этой задачи показаны на рис. 1 и 2.

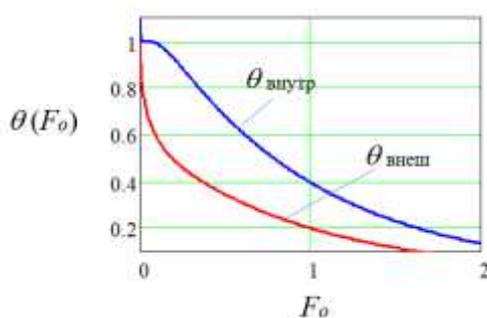


Рис. 1. Изменение относительной температуры во времени

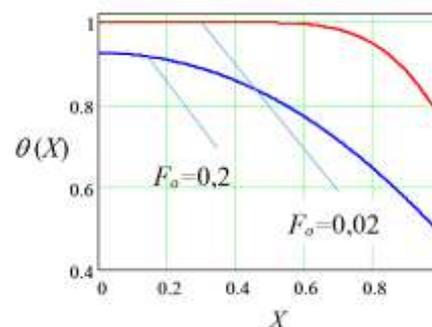


Рис. 2. Изменение относительной температуры по толщине пластины

При оценивании картины теплового нагружения пластин газохода ПО важным параметром является значение времени прогрева пластины. С этой целью можно использовать соотношение (рис. 3)

$$\Delta\theta(Fo) = \theta_{\text{внеш}} - \theta_{\text{внутр}}$$

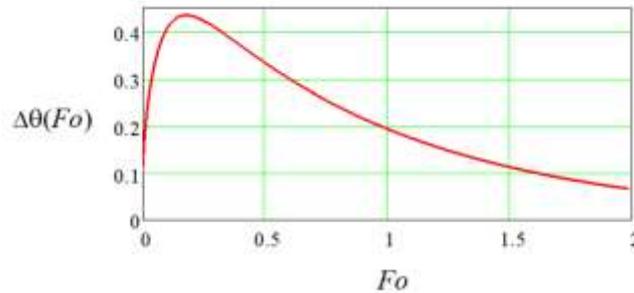


Рис. 3. Перепад температур по толщине пластины во времени

Принимая для времени прогрева $Fo_{\text{пр}}$ условие $\frac{\partial \Delta\theta(Fo)}{\partial Fo} = 0$ в результате аналитических расчетов с привлечением первых 12 членов бесконечного ряда для диапазона $\alpha_{\text{газ}}$ от 1000 до 3000 или Bi от 0.889 до 2.667 по уравнению (3) получено соотношение (рис. 4)

$$Fo_{\text{пр}} = \frac{0.229}{Bi^{0.4}} \quad (4)$$

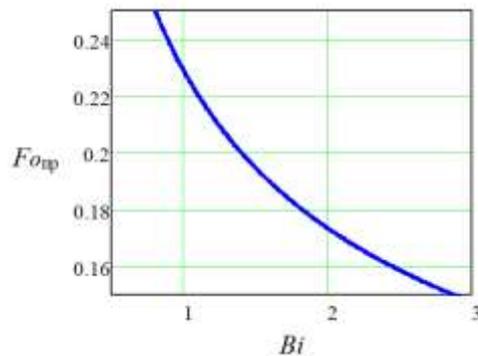


Рис. 4. Зависимость относительного времени прогрева пластины от безразмерной толщины пластины

Переводя соотношение (4) в размерный вид получим следующее соотношение для времени прогрева пластины

$$t_{\text{пр}} = \frac{0.229}{Bi^{0.4}} \cdot \frac{\delta_{\text{ст}} \cdot c_{\text{ст}} \cdot \rho_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} = \frac{0.229}{\left(\frac{\alpha_{\text{газ}} \cdot \delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}}\right)^{0.4}} \cdot \frac{\delta_{\text{ст}} \cdot c_{\text{ст}} \cdot \rho_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}}, \quad (5)$$

что для значений:

$$\alpha_{\text{газ}} = 2000 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^0}, \quad \delta_{\text{ст}} = 0.04 \text{ м}, \quad c_{\text{ст}} = 462 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}^0}, \quad \rho_{\text{ст}} = 7800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \text{ и } \lambda_{\text{ст}} = 45 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}^0}$$

составляет $t_{\text{пр}} = 23,3$ с.

На основании соотношения (5), рассматривая толщину пластины как некую функцию $f(x)$, изменяющуюся от 0 до $\delta_{\text{ст}}$, можно ввести уравнение для оценивания скорости прогрева пластины по ее толщине (рис. 5):

$$u(x) = \frac{x}{t_{\text{пр}}(x)} = \frac{x}{\frac{0.229}{\left(\frac{\alpha_{\text{газ}} \cdot x}{\lambda_{\text{ст}}}\right)^{0.4}} \cdot \frac{x \cdot c_{\text{ст}} \cdot \rho_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}}}$$

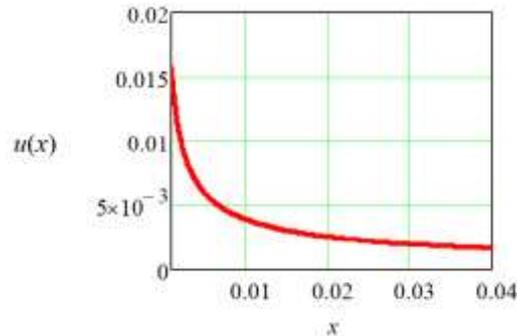


Рис. 5. Оценочная зависимость для скорости прогрева пластины вдоль ее толщины

Из рис. 5 следует, что тепловой фронт распространяется в толщю пластины тем медленнее, чем он глубже в нее заходит.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ НЕСТАЦИОНАРНОГО НАГРЕВА ИНТЕГРАЛЬНЫМИ МЕТОДАМИ

Задача аналитического анализа нестационарной теплопроводности для граничных условий II рода [4], когда внешний тепловой поток не меняется, соответствует случаю пуска РКН тяжелого и сверхтяжелого классов. Анализ теплового нагружения пластин газохода ПО для этого случая не может быть проведен по аналитическому решению уравнения (2), поскольку граничное условие

$$X = 0; \frac{\partial \theta}{\partial X} = -Q$$

не обеспечивает нахождение необходимых констант интегрирования. Эта задача соответствует процессу с появлением плавления на наружной поверхности пластины и формулируется следующим образом.

Вводится безразмерная температура в виде соотношения

$$\vartheta = \frac{(T - T_0)}{(T_{\text{плавл}} - T_0)}$$

где T – текущее значение температуры пластины;

T_0 – начальное значение температуры;

$T_{\text{плавл}}$ – температура плавления пластины.

Используя, как и ранее, безразмерные параметры для линейной координаты по толщине пластины X и безразмерного времени Fo , а также безразмерного внешнего теплового потока $Q = \frac{q}{q_m}$ для анализа решения уравнения

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial X^2}$$

следует использовать следующие условия:

– начальное условие:

$$Fo = 0; 0 < X < 1; \vartheta = 0.$$

– граничные условия:

$$0 < Fo < Fo_{\text{плавл}}; X = 0, \frac{\partial \vartheta}{\partial X} = -Q; X = 1, \frac{\partial \vartheta}{\partial X} = 0,$$

где $Fo_{\text{плавл}}$ – безразмерное время начала плавления.

Для решения этой задачи целесообразно представить функцию $\vartheta(Fo, X)$ в виде относительно простого соотношения с пока неизвестными составляющими:

$$\vartheta = a + bX_T + cX_T^2.$$

После интегрирования этой функции по толщине пластины можно получить обыкновенные дифференциальные уравнения для неизвестных составляющих, которые далее можно решить аналитически. Интегрирование этой функции в соответствии с граничными условиями можно записать в виде соотношения

$$\frac{d}{dFo} \int_0^1 \vartheta dX = \int_0^1 \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial X^2} dX = \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial X} \right)_1 - \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial X} \right)_0 = Q. \quad (6)$$

Используя описанный ранее результат по определению времени прогрева пластины, можно ввести понятия термического слоя, в границах которого температура пластины становится выше начальной. Такой термический слой по толщине пластины имеет координаты от $X = 0$ до $X = X_T$.

В результате интегральное соотношение (6) примет вид

$$\frac{d}{dFo} \int_0^{X_T} \vartheta dX = Q.$$

Оценочные соотношения для рассматриваемой задачи можно получить, если распределение температуры по толщине пластины в термическом слое задать в виде параболы, вид которой напоминает график изменения температуры, показанной на рис. 2:

$$\vartheta = a + bX_T + cX_T^2,$$

где a, b, c – искомые величины, в общем случае функции безразмерного времени. Для поиска этих величин используем соотношение

$$\left(\frac{\partial \vartheta}{\partial X} \right)_1 - \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial X} \right)_0 = b + 2c - b = Q; \quad c = \frac{Q}{2}$$

и граничные условия:

$$\left(\frac{\partial \vartheta}{\partial X} \right)_0 = -Q = b; \quad \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial X} \right)_{X_T} = 0 = b + 2cX_T.$$

Откуда

$$b = -Q; \quad c = -\frac{b}{2X_T},$$

тогда

$$\vartheta = a + bX_T - \frac{b}{2X_T} = a - \frac{Q}{2}X_T.$$

Для определения величины a следует использовать граничное условие за пределами термического слоя:

$$(\vartheta_0)_{X=X_T} = 0 = a - \frac{Q}{2}X_T,$$

откуда

$$a = \frac{Q}{2}X_T.$$

После чего можно записать выражение

$$\begin{aligned} \frac{d}{dFo} \int_0^{X_T} (a + bX_T + cX_T^2) dX &= \frac{d}{dFo} \left(aX_T + b \frac{X_T^2}{2} + c \frac{X_T^3}{3} \right) = \\ &= \frac{d}{dFo} \left(\frac{Q}{2} X_T^2 - Q \frac{X_T^2}{2} + \frac{Q}{2} \frac{X_T^3}{3} \right) = Q \end{aligned}$$

или

$$\frac{Q}{6} X_T^3 = Q \cdot Fo_{\text{плав}}$$

Тогда

$$X_T = \sqrt[3]{6 \cdot Fo_{\text{плав}}}$$

и окончательно

$$X_T = 1.817 \sqrt[3]{Fo_{\text{плав}}}$$

Для условия $X_T = 1$ (выход теплового поля на внутреннюю поверхность пластины) $Fo_{\text{плав}} = 0.167$, что согласно зависимости (4) соответствует условию $Bi = 2.22$ для следующих параметров:

$$\alpha_{\text{газ}} = 2500 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^0}, \delta_{\text{ст}} = 0.04 \text{ м}, c_{\text{ст}} = 462 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}^0}, \rho_{\text{ст}} = 7800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \text{ и } \lambda_{\text{ст}} = 45 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}^0}.$$

Это соответствует времени начала плавления наружной поверхности пластины

$$t_{\text{плав}} = 21,32 \text{ с.}$$

Полученные аналитические выражения позволяют получить следующие полезные для анализа соотношения:

$$\vartheta_0 = \frac{Q}{2} X_T = 0.908 \cdot Q \sqrt[3]{Fo};$$

$$\vartheta_0 = 1 = 0.908 \cdot Q \cdot \sqrt[3]{Fo_{\text{пл}}}$$

Тогда

$$Q = \frac{\delta^{0.667} \cdot c^{0.333} \cdot \rho^{0.333}}{t^{0.333} \cdot \lambda^{0.333}};$$

$$Fo_{\text{плав}} = \frac{1.336}{Q^3};$$

$$X_{T \text{ плав}} = \frac{2}{Q}.$$

В задачах с высоким внешним тепловым потоком, когда наблюдаются процессы абляции в обтекаемой газом пластине, используется граничное условие I рода [5]. В этих задачах внешний тепловой поток расходуется на прогрев пластины и на переход слоя материала пластины в жидкое состояние, а также на его снос в зоне абляции:

$$q_{\text{нагрев}} + q_{\text{абл}} = q_{\text{вн}},$$

что можно записать в виде соотношения

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} + L \cdot G_{\text{абл}} = q_{\text{вн}},$$

где L – скрытая теплота плавления материала стенки;

$G_{\text{абл}}$ – удельный расход расплавленного и унесенного материала.

Записав

$$G_{\text{абл}} = \rho \frac{dx_a}{dt},$$

где x_a координата зоны начала абляции, а ρ – плотность материала пластины, тепловой баланс можно переписать в виде

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} + L \cdot \rho \cdot \frac{dx_a}{dt} = q_{\text{вн}}. \quad (7)$$

При введении масштабов для уравнения (7):

$$q_{\text{вн}} = Q \cdot q_m = Q \cdot \left(-\lambda \frac{T_0 - T_{\text{плав}}}{\delta} \right); x_a = X_a \cdot \delta; x = X \cdot \delta; t = Fo \cdot \frac{\delta^2}{\lambda} \cdot c \cdot \rho;$$

$$\vartheta = \frac{(T - T_0)}{(T_{\text{плав}} - T_0)},$$

оно примет вид

$$-\frac{\partial \vartheta}{\partial X} + p \cdot \frac{dX_a}{dFo} = Q, \quad (8)$$

где $p = \frac{L}{c \cdot (T_{\text{плав}} - T_0)}$

Для задачи с абляцией распределение температуры $\vartheta(Fo_{\text{плавл}}, X)$ является начальным условием. Для решения этой задачи следует использовать собственное интегральное соотношение, записанное для условия $\vartheta_{\text{плавл}} = 1$:

$$\int_0^1 \vartheta dX = \int_0^{X_a} \vartheta_{\text{плавл}} dX + \int_{X_a}^{X_T} \vartheta dX = X_a + \int_{X_a}^{X_T} \vartheta dX,$$

где $X_a = X_a(Fo)$ – координата аблирующей поверхности пластины.

На основании этого, интегральное соотношение с учетом граничных условий примет вид

$$\frac{d}{dFo} \left(X_a + \int_{X_a}^{X_T} \vartheta dX \right) = \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial X} \right)_{X_T} - \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial X} \right)_{X_a} = Q - p \frac{dX_a}{dFo}$$

или

$$\frac{d}{dFo} \int_{X_a}^{X_T} \vartheta dX = Q - (1 + p) \frac{dX_a}{dFo}.$$

Для задачи прогрева с абляцией функция безразмерной температуры $\vartheta(Fo, X)$ сводится к поиску как функции X_T , так и функции X_a .

Вид функции $\vartheta(Fo, X)$ целесообразно задать так, чтобы начальный момент абляции соответствовал полученному ранее распределению температуры для этапа прогрева. Поэтому для момента времени $Fo > Fo_{\text{плавл}}$ такая функция может иметь вид

$$\vartheta(Fo, X) = a1 + b1(X - X_a) + c1(X - X_a)^2, \quad (9)$$

где $a1, b1, c1$ неизвестные величины, определяемые информацией о процессе.

Из граничных условий на аблирующей поверхности следует:

$$X = X_a; \vartheta = 1; a1 = 1$$

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial X} = b1 + 2c1(X - X_a) = b1,$$

а с учетом соотношения (8)

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial X} = -Q + p \frac{dX_a}{dFo} = b1. \quad (10)$$

Из второго граничного условия $X = X_T$ и после введения обозначения $\Delta X = X_T - X_a$ следует

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial X} = b_1 + 2 \cdot c_1 \cdot \Delta X,$$

откуда

$$c_1 = -\frac{b_1}{2\Delta X}.$$

Вместе с тем, из второго граничного условия $\vartheta = 0, X = X_T$ при полученном ранее значении $a_1 = 1$ следует

$$\vartheta = 0 = 1 + b_1 \cdot \Delta X + c_1 \cdot \Delta X^2, \quad (11)$$

а с учетом того, что

$$c_1 = -\frac{b_1}{2\Delta X},$$

следует, что

$$b_1 = -\frac{2}{\Delta X}; \quad c_1 = \frac{1}{\Delta X^2}.$$

Подставляя значение b_1 в соотношение (10) получается обыкновенное дифференциальное уравнение для определения координаты аблирующей поверхности в виде

$$\frac{dX_a}{dFo} = \frac{1}{p} \left(Q - \frac{2}{\Delta X} \right). \quad (12)$$

Поскольку величина $\Delta X = X_T - X_a$ является переменной, для ее определения следует воспользоваться соотношением

$$\frac{d}{dFo} \int_{X_a}^{X_T} \vartheta dX = Q - (1+p) \frac{dX_a}{dFo} = \frac{1}{p} \left(\frac{2(1+p)}{\Delta X} - Q \right),$$

но вместе с тем

$$\begin{aligned} \frac{d}{dFo} \int_{X_a}^{X_T} \vartheta dX &= \frac{d}{dFo} \int_{X_a}^{X_T} (1 + b_1 \cdot \Delta X + c_1 \cdot \Delta X^2) dX = \\ &= \frac{d}{dFo} \left(\Delta X + b_1 \frac{\Delta X^2}{2} + c_1 \frac{\Delta X^3}{3} \right), \end{aligned}$$

а с учетом того, что

$$b_1 = -\frac{2}{\Delta X}; \quad c_1 = \frac{1}{\Delta X^2},$$

получим

$$\frac{d}{dFo} \left(\frac{\Delta X}{3} \right) = \frac{1}{3} \frac{d\Delta X}{dFo}$$

и с учетом выражения (12) второе дифференциальное уравнение для процесса нагрева с абляцией примет вид

$$\frac{d\Delta X}{dFo} = \frac{3}{p} \left(\frac{2(1+p)}{\Delta X} - Q \right). \quad (13)$$

Уравнения (12) и (13) с учетом того, что

$$\frac{d\Delta X}{dFo} = \frac{dX_T}{dFo} - \frac{dX_a}{dFo}$$

могут быть решены численно как система уравнений.

Начальными условиями для этих уравнений являются:

$$Fo = Fo_{\text{плав}} = \frac{1.336}{Q^3}; X_a = 0; X_T = \frac{2}{Q}.$$

Для значений следующих физических величин:

$$\alpha = 3000 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^0}, \delta = 0.04 \text{ м}, \lambda = 45 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}^0}, c = 462 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}^0}, L = 80 \frac{\text{Кдж}}{\text{кг} \cdot \text{К}^0}$$

$$T_0^{\text{газ}} = 2500 \text{ К}^0, T_0^{\text{ст}} = 293 \text{ К}^0, T_{\text{плав}}^{\text{ст}} = 1812 \text{ К}^0$$

зависимости $X_a(Fo)$, $X_T(Fo)$ представлены на рис. 6.

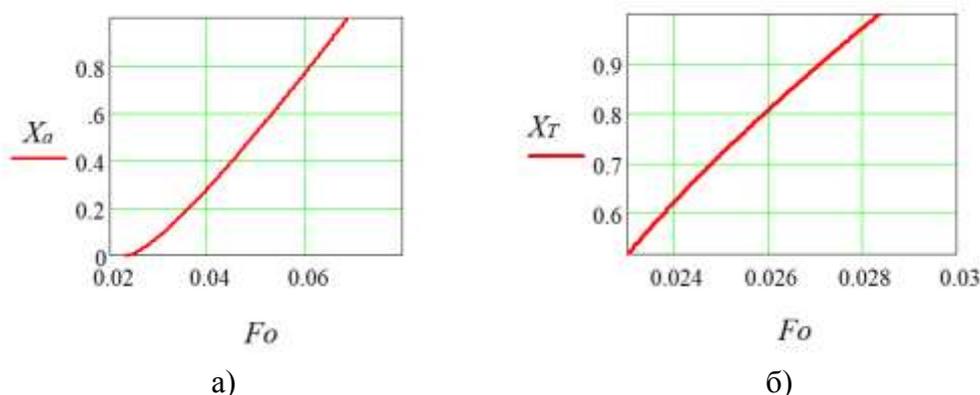


Рис. 6. Изменение относительных величин координат уноса материала пластины при абляции (а) и координаты начала фронта плавления пластины (б)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены задачи нестационарного нагрева пластин пускового оборудования, характерные для процессов пуска ракет космического назначения. Представлены аналитические соотношения для оценивания тепловых полей в плоской бесконечной пластине для различных граничных условий. Аналитические соотношения предназначены для оценочных инженерных расчетов, используемых при прогнозировании ресурсных показателей пускового оборудования ракетно-космических комплексов.

Список используемых источников

1. Наземное технологическое оборудование : учебник / В. В. Козлов [и др.]. – СПб. : ВКА имени А. Ф. Можайского, 2023. – 534 с.
2. Кобельков В. Н., Улас В. Д., Федоров Р. М. Термодинамика и теплопередача / под ред. Р. М. Федорова. – М. : ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 2012. – 328 с.
3. Аналитическое описание процесса нестационарной теплопроводности : учебно-методич. пособие / Б. А. Вороненко [и др.]. – СПб. : НИУ ИТМО; ИХ и БТ, 2014. – 48 с.
4. Бухмиров В. В., Ракутина Д. В., Солнышкова Ю. С. Нестационарная теплопроводность : Справочные материалы для решения задач. – Иваново : Ивановский ГЭУ им. В. И. Ленина, 2012. – 36 с.
5. Кудинов В. А., Кудинов И. В. Математическое моделирование процессов теплообмена и фазовых превращений с учетом абляции // Инженерно-физический журнал. – 2011. – Т. 84, № 5. – С. 1065–1075.

Е. М. Батыршин;
А. В. Пачин,
кандидат технических наук;
А. А. Столяров,
кандидат технических наук

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Появление новых задач в деятельности человека, а также постоянное стремление к повышению эффективности деятельности самого различного рода определяет постоянное усложнение используемых инструментов. В настоящее время основу успешного достижения целей в области освоения космического пространства, развития промышленности, здравоохранения и безопасности обеспечивают сложные технические комплексы, состоящие из значительного числа компонент. При этом наиболее актуальна задача восстановления работоспособности техники при отказах, возникающих в ходе эксплуатации.

Описан подход к построению системы восстановления работоспособности, основывающейся на технологиях искусственного интеллекта (семантических онтологических моделях). Применение подобных систем позволит существенно сократить время восстановления функционирования комплекса, и, как следствие, сократить определяемые простоями оборудования потери.

Ключевые слова: сложные технические комплексы, надежность, искусственный интеллект, семантические системы, онтологическое моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Современные сложные технические комплексы применяются при решении широкого спектра задач на производстве, транспорте, в здравоохранении. Решение задачи обеспечения обороноспособности государства в современных условиях также немислимо без применения сложнейшей техники на всех уровнях. Автоматизированные системы управления, космические системы, средства дальнего обнаружения, комплексы подготовки, запуска и управления космическими аппаратами включают в свой состав сотни тысяч элементов различного типа, объединенных в системы и подсистемы. Вместе с тем даже применение самых современных материалов, компонентов и различных конструкторских решений, направленных на повышение надежности сложных технических комплексов (СТК), не позволит полностью исключить отказы, приводящие комплекс в неработоспособное состояние. Последствия утраты возможности выполнять свои функции зачастую весьма существенны. Отказы комплексов автоматического производства, управления транспортом, энергоснабжения влекут за собой значительные финансовые и репутационные потери. Выход из строя техники, обеспечивающей выполнение медицинских мероприятий, решение задач безопасности жизнедеятельности или защиты оборонных интересов государства может привести к катастрофическим последствиям.

Восстановление работоспособного состояния СТК – целеустремленный процесс, который может быть декомпозирован на несколько этапов:

- установление факта отказа на основании индикации и значений диагностических параметров;
- активацию резервных элементов при их наличии и исправности;
- идентификацию и локализацию отказавших элементов;
- прибытие ремонтно-восстановительного расчета;
- доставку необходимых запасных частей, инструментов и принадлежностей;
- выполнение операций по замене элементов;
- проведение функционального контроля восстановленного оборудования.

Каждый из этапов характеризуется, в первую очередь, длительностью его выполнения, а также привлекаемыми ресурсами. Возникающие на том или ином этапе процесса задержки непосредственно влияют на длительность нахождения СТК в неработоспособном состоянии, и на последствия данной негативной ситуации.

Таким образом, с учетом объективной невозможности абсолютного исключения отказов техники, главной целью системы технического обслуживания и ремонта СТК является повышение оперативности восстановления работоспособности СТК.

Опыт реальной эксплуатации показывает, что даже с учетом наличия средств автоматизации, SCADA-систем и систем поддержки принятия решений, основная роль в организации и проведении мероприятий восстановления отводится эксплуатирующему персоналу. При этом оперативность действий восстановительных расчетов в первую очередь зависит от наличия формализованной информации, содержащей порядок действий по устранению неисправностей, и необходимых ЗИП. Однако в силу сложности структуры СТК, разнородности включаемых в их состав систем и элементов, зачастую составление единой унифицированной документации по восстановлению невозможно. Наиболее распространена ситуация, при которой каждое предприятие-изготовитель составляет подобную документацию только на свои изделия. Как следствие, решение по локализации отказа и проведению операции ремонта принимается расчетом на основе множества документов и личного опыта. Это требует дополнительного времени и влечет существенное увеличение времени нахождения техники в неработоспособном состоянии, особенно при отсутствии в составе расчетов персонала, имеющего достаточный опыт.

Таким образом, задача создания математического аппарата, направленного на повышение оперативности восстановления работоспособности СТК в условиях несовершенства информационного обеспечения процесса ремонта и ограниченности имеющихся ресурсов, является в значительной степени актуальной [1].

Одним из целесообразных направлений разрешения противоречия между необходимостью максимально оперативного восстановления работоспособности СТК и задержками, вызванными отсутствием комплексной формализованной информации по устранению неисправностей, является применение интеллектуальных систем восстановления работоспособности (ИСВР). Основой функционирования подобных систем являются аппаратно-программные средства, реализующие технологии искусственного интеллекта, включая компьютерное зрение, обработку искусственного языка, распознавание и синтез речи, интеллектуальную поддержку решений [2], которая в первую очередь основывается на выполняющих обработку знаний семантических системах с онтологическими моделями.

ОНТОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Семантическая система – алгоритм и реализующая его компьютерная программа, обрабатывающая данные с обязательным учетом их смыслового содержания. Основной особенностью подобных систем является хранение данных в массивах определенного формата, в виде унифицированных утверждений, отношений, аксиом и правил. Это позволяет реализовать работу алгоритмов поиска и логического вывода, в том числе и для генерации новых данных.

Онтологическая модель – формализованное в виде онтологии описание концептуализации предметной области. В контексте СТК – это описание всех компонент комплекса, составляющих систем и элементов, связей и отношений между ними, протекающих процессов, ситуаций, событий и их последствий.

В соответствии с описанной концепцией онтологического моделирования и задачей восстановления работоспособности СТК может быть представлен в виде систем и подсистем, в свою очередь, состоящих из набора элементов $E = (e_1, e_2, \dots, e_a, \dots, e_A)$. Перечисленные ком-

поненты комплекса связаны между собой отношениями типа «включает в себя», «входит в состав». К примеру, система электроснабжения (СЭС) включает в себя подсистемы высокого (ПВН) и низкого напряжений (ПНН). В онтологической модели эти факты записаны следующим образом:

- «включает в себя (СЭС, ПВН)»;
- «включает в себя (СЭС, ПНН)»;
- «входит в систему (ПВН, СЭС)»;
- «входит в систему (ПНН, СЭС)».

Такие же отношения связывают подсистемы и составляющие их элементы. Кроме того, имеются элементы, входящие непосредственно в состав комплекса, без принадлежности к системе/подсистеме. Онтологическая модель СТК в виде графа представлена на рис. 1.

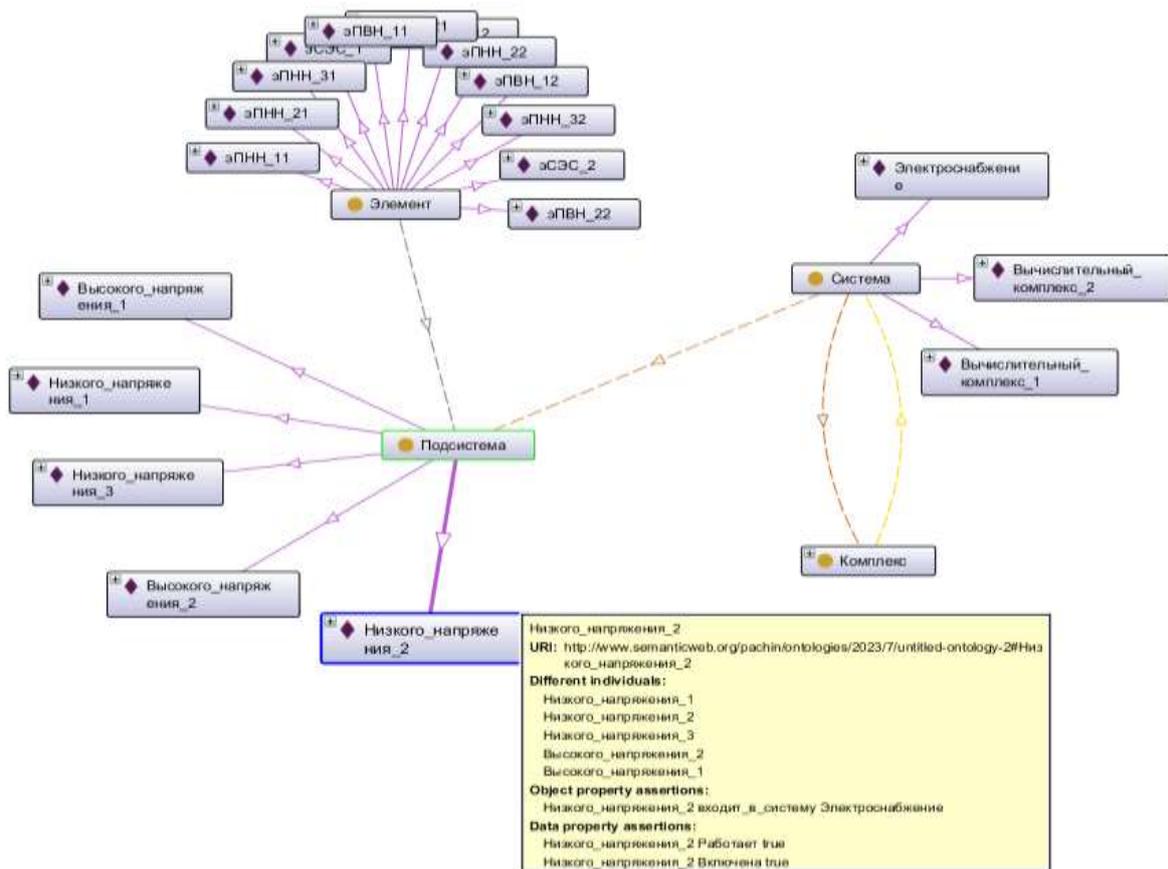


Рис. 1. Граф онтологической модели СТК

Техническое состояние каждого критичного для функционирования элемента описывается значением соответствующей переменной, при отказе $e_a = 0$, в противоположной ситуации $e_a = 1$.

Комплекс оснащен системой измерения параметров элементов и индикации признаков. Множество оценок значений измеряемых параметров $P = (p_1, p_2, \dots, p_b, \dots, p_B)$, в случае соответствия b -го параметра заданным требованиям $p_b = 1$, в противоположной ситуации $p_b = 0$.

Множество показаний приборов индикации $I = (i_1, i_2, \dots, i_c, \dots, i_C)$, при нормальных значениях показаний $i_c = 1$, в противоположной ситуации $i_c = 0$.

На основе значений показаний индикаторов и/или значений измеряемых параметров должно быть сделано заключение о том, какие из элементов находятся в неработоспособном состоянии $X = (x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_J)$, множество X содержит индексы элементов СТК, у кото-

рых $e_a = 0$. В свою очередь, информация об отказавших элементах служит основой для принятия решения на восстановление работоспособности: какие действия должны быть выполнены и какое материальное обеспечение необходимо.

Вербально задача ИСВР может быть сформулирована следующим образом: при известном составе оборудования СТК, на основе значений измеряемых диагностических параметров и показаний индикаторных элементов, за счет вывода информации об отказавших элементах определить, какие операции из множества $O = (o_1, o_2, \dots, o_k, \dots, o_K)$, определенного в эксплуатационной документации, необходимо выполнить ремонтному расчету, и какие запасные части, инструмент и принадлежности из множества $Z = (z_1, z_2, \dots, z_h, \dots, z_H)$ при этом должны быть использованы.

Дано:

$P = (p_1, p_2, \dots, p_b, \dots, p_B)$ – множество оценок значений измеряемых параметров СТК;

$I = (i_1, i_2, \dots, i_c, \dots, i_C)$ – множество показаний приборов индикации.

Найти: Ω – множество параметров решения на восстановление работоспособности СТК:

$$\Omega = f(X), \quad X = f(I, P),$$

где X – множество индексов отказавших элементов СТК. При этом $\Omega = (O^*, Z^*)$, $O^* = (o_1^*, o_2^*, \dots, o_k^*, \dots, o_K^*)$ – множество номеров операций, необходимых для восстановления работоспособности СТК, а $Z^* = (z_1^*, z_2^*, \dots, z_h^*, \dots, z_H^*)$ – множество индексов запасных частей, инструментов и принадлежностей, необходимых для восстановления работоспособности СТК.

Определение значений искомых множеств с помощью онтологических моделей базируется на реализации алгоритма логического вывода. Его основой являются включаемые в состав модели продукционные правила, описывающие логику функционирования СТК и взаимодействия его компонент. К примеру, работоспособность подсистемы вычислительного комплекса (ВК), включающей в себя элементы процессорного модуля e_1 и модуля памяти e_2 , техническое состояние которых определяется по соответствующим диагностическому параметру – тактовая частота (p_1) и показанию индикатора (i_1) может быть описана следующими правилами в виде логических функций:

«входит в систему (e_1 , ВК)»;

«входит в систему (e_2 , ВК)»;

$p_1 \rightarrow e_1$, (если «равно ($p_1, 1$)» то «равно ($e_1, 1$)»);

$i_1 \rightarrow e_2$, (элемент работоспособен, если показания индикатора нормальные);

$e_1 \wedge e_2 \rightarrow \text{ВК}$. (ВК работоспособен, если работоспособны элементы).

Источниками наполнения баз знаний и правил служат эксплуатационная документация и знания специалистов, применяющих и обслуживающих оборудование СТК.

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ

Применение к включенным в модель правилам алгоритма логического вывода позволит получить информацию о работоспособности компонент комплекса, а также об отказавших элементах, вызвавших переход в неработоспособное состояние. При этом одним из известных недостатков классического логического вывода правил (наивного поиска) является существенное время, затрачиваемое на получение результата за счет многократного просмотра правил. Скорость поиска может быть увеличена при применении метода сопоставления с образцами посылок правил, формируемых предварительно [3]. Образцы посылок правил формируются при создании, либо при дополнении базы правил и включаются в нее. После этого для выполнения логического вывода достаточно однократного просмотра этой базы, что существенно сокращает время, необходимое для нахождения итоговых следствий.

Схема ИСВР представлена на рис. 2.



Рис. 2. Схема интеллектуальной системы восстановления работоспособности

ИСВР включает два модуля, применяющих онтологическую модель. Задача первого модуля – в случае изменения значений измеряемых параметров и индикаторов выполнить логический вывод, результатом которого является решение об отказе СТК, а также информация о множестве отказавших элементов X . Формируются оповещения для дежурного персонала. При наличии в составе отказавших подсистем актуаторов систем автоматического резервирования, модуль формирует команду на их включение.

Задачей второго модуля является формирование на основе онтологической модели и выводов первого модуля информации для решения на восстановление работоспособности СТК [4]. Для выполнения этой задачи используются продукционные правила, сформированные на основе инструкций по поиску и устранению неисправностей. На основе данной документации, а также опыта эксплуатации типовых систем из состава других СТК, а также схожих по задачам и конструкции подсистем и элементов формируются следующие правила:

$e_2 \rightarrow o_4$ (в случае отказа процессорного модуля необходима его замена – операция o_4),

$o_4 \rightarrow z_1$ (для выполнения операции o_4 использовать инструмент z_1),

$o_4 \rightarrow z_5$ (для выполнения операции o_4 использовать запасную часть z_5),

$o_4 \rightarrow o_1$ (после выполнения операции o_4 выполнить операцию o_1 – функциональный контроль оборудования ВК).

Входной информацией для алгоритма логического вывода является множество индексов отказавших элементов X , поступающее из первого модуля.

Индексы операций, выполнение которых необходимо для восстановления работоспособности, и ЗИП, необходимых для выполнения этих операций, помещаются во множества O^* и Z^* . Эти данные являются параметрами решения на восстановление работоспособности и используются дежурным персоналом или ремонтным расчетом.

Приведенный алгоритм работы модулей ИСВР характерен для большинства экспертных систем, основанных на семантических моделях и базах знаний.

Существенными недостатками подобных систем являются недостаточный прогностический потенциал, невозможность реализации с их помощью проактивного управления. Для решения этих проблем в состав представленной ИСВР включается модуль предиктивного анализа, использующий нейросетевые технологии искусственного интеллекта.

МОДУЛЬ ПРЕДИКТИВНОГО АНАЛИЗА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

Задачей модуля является формирование прогноза изменения технического состояния СТК с целью заблаговременного принятия решений на восстановление работоспособности.

Многие классические методы прогнозирования временных рядов, такие как регрессия или методы машинного обучения, основаны на допущении об известном виде закона, описывающего изменение диагностических параметров. Однако опыт реальной эксплуатации показывает, что такое допущение зачастую приводит к существенным погрешностям, особенно в сложных системах из множества взаимовлияющих элементов.

В представленной ИСВР прогнозирование изменения значений диагностических параметров осуществляется с применением технологий искусственных нейронных сетей (ИНС).

При прогнозировании изменения диагностических параметров наиболее эффективным является алгоритм «открытой петли», при котором с поступлением обновленных данных от сенсорного поля СТК проводится дообучение ИНС, что повышает точность прогнозирования относительно алгоритма «закрытой петли» (рис. 3).

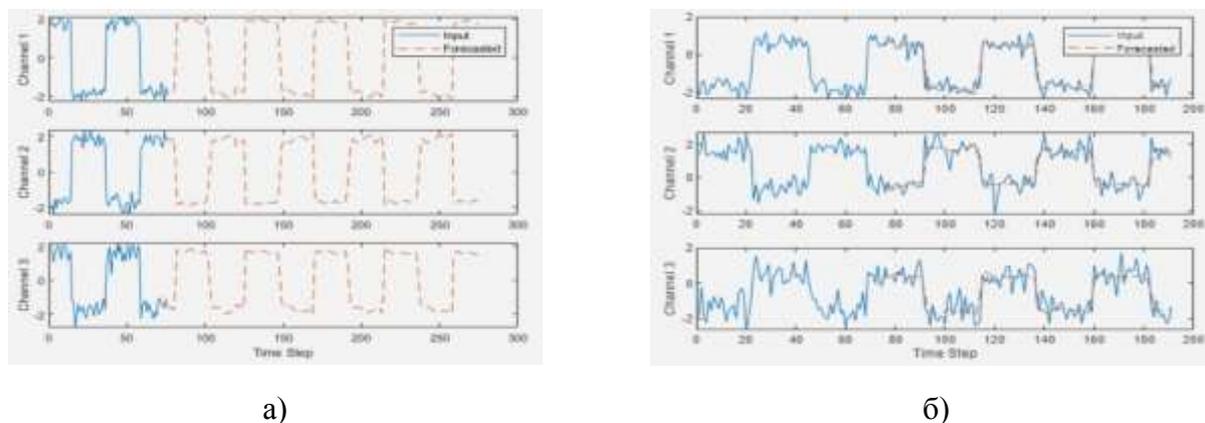


Рис. 3 Прогнозы изменения значений диагностических параметров, полученные с помощью алгоритмов «закрытой петли» (а) и «открытой петли» (б)

Однако простые ИНС не обеспечивают достаточной точности прогнозирования, это определяется эффектом накопления ошибки. Для устранения указанного недостатка целесообразным является применение рекуррентных ИНС. В подобных сетях выходные данные формируются не только на основе текущих входных значений, но также с учетом предыдущего состояния ИНС. Подобные сети позволяют получать прогнозы для отдельных диагностических признаков с достаточно высокой точностью.

Модуль предиктивного анализа технического состояния предусматривает использование кластера рекуррентных ИНС, в котором для прогнозирования изменения каждого параметра системы на равную глубину (окно прогнозирования) используется свой нейросетевой модуль. Данный подход позволяет получить прогнозное множество значений параметров сенсоров СТК $P_{II} = (p_{1II}, p_{2II}, \dots, p_{iII}, \dots, p_{III})$. В каждый дискретный момент времени такое множество соответствует цифровой диагностической сигнатуре комплекса, графическое представление варианта которой приведено на рис. 4.

При каждом получении P_{II} проводится ее сравнение с сигнатурой, соответствующей работоспособному состоянию, или текущей сигнатурой P_t . Разница между сигнатурами Δ_t определяется как расстояние между точками в I -мерном пространстве, где I равно количеству датчиков, данные которых отражены в сигнатуре [5].

На основе полученного значения Δ_t принимается решение о возможном изменении технического состояния системы, в том числе по переходу системы в неисправное, частично работоспособное или неработоспособное состояние.

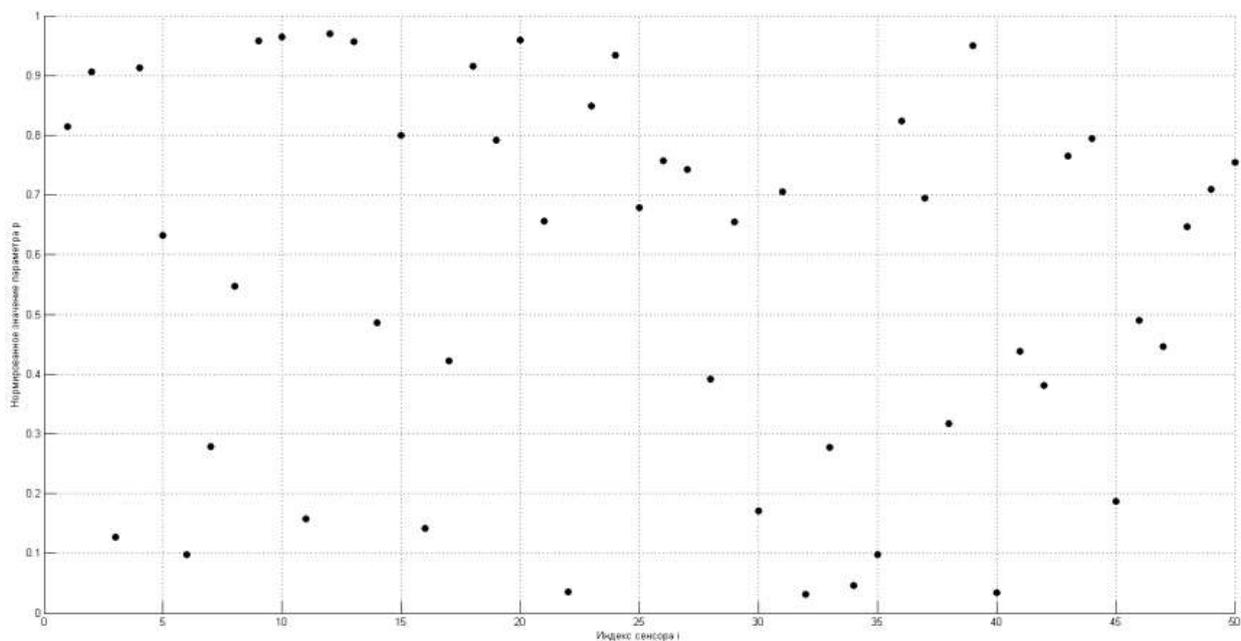


Рис. 4. Вариант диагностической сигнатуры, отображающей нормированные данные 50 сенсоров

В случае неблагоприятного прогноза множество $P_{п}$ передается в первый модуль ИСВР в качестве прогнозных оценок значений параметров сенсоров. На основе этого множества выполняется логический вывод, определяется прогнозное множество отказавших элементов. В свою очередь, на его основе вторым блоком системы формируется прогнозная информация для решения на восстановление работоспособности [6].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная интеллектуальная система обеспечивает решение задачи формирования множества параметров плана восстановления работоспособности оборудования СТК. Основываясь на методологии онтологического моделирования с применением алгоритма логического вывода по образцам посылок продукций, ИСВР позволяет в автоматическом режиме формировать множества выполняемых операций, и необходимых для этого ЗИП.

Вместе с тем онтологии, при условии построения на основе стандартов, позволяют осуществлять масштабирование и слияние, что позволяет оперативно формировать базы знаний и правил для СТК из отдельных фрагментарных моделей, созданных разработчиками составляющих комплекс систем независимо друг от друга на основе собственной документации и опыта.

В отличие от существующих аналогичных систем, в состав ИСВР включен модуль предиктивного анализа, позволяющий на основе рекуррентных нейронных сетей формировать прогноз изменения технического состояния оборудования. На основе прогнозной информации формируются варианты решений для восстановления работоспособности в случае предполагаемых отказов.

Таким образом, сочетание в предлагаемой ИСВР различных технологий искусственного интеллекта позволяет реализовать концепцию проактивного управления техническим состоянием и повысить оперативность восстановления работоспособности СТК.

Список используемых источников

1. *Балухта А. Н., Романов А. А.* Искусственный интеллект в космической технике: состояние, перспективы развития // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2019. – Т. 6, вып. 1. – С. 65–75.
2. Национальная стратегия развития искусственного интеллекта на период до 2020 года : [утв. указом Президента РФ от 10.10.2019 г. № 490 «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации»]. – URL : <https://www.kremlin.ru/acts/bank/44731> (дата обращения: 13.04.2024).
3. *Массель Л. В., Ан Г. В., Пестерев Д. В.* Реализация логического вывода в производственной экспертной системе с использованием Rete-сети и реляционной базы данных // Программные продукты и системы. – 2020. – № 4(33). – С. 582–590.
4. *Любарский Ю. Я., Александров Н. М., Радин П. С.* Послеаварийное восстановление энергоснабжения с помощью интеллектуальных систем // Энергия единой сети. – 2018. – № 2(37). – С. 52–57.
5. *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.
6. *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.

А. В. Белянкин,
кандидат технических наук;
В. В. Дуга,
кандидат технических наук;
М. М. Полуян,
кандидат технических наук, доцент

ПОВЫШЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ РАДИАТОРОВ СИСТЕМ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ МИКРОАППАРАТОВ

В статье рассматриваются перспективы развития космических микроаппаратов в направлении повышения энергопотребления и увеличения тепловых потоков. Приведены расчеты характеристик различных поверхностей радиаторов-излучателей, сделаны выводы о наиболее эффективном типе их излучающих поверхностей.

Ключевые слова: космический микроаппарат, радиатор-излучатель, система обеспечения теплового режима, система терморегулирования, лучистый теплообмен.

ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе развития ракетно-космической техники широкое применение получили космические микроаппараты (МКР КА) формата CubeSat. В настоящее время на МКР КА указанного типа применяется схема отвода тепла от приборов за счет теплопроводности с дальнейшим сбросом тепловой энергии в околоземное космическое пространство с излучающей поверхности МКР КА. Так как развитие МКР КА идет по пути улучшения характеристик целевой аппаратуры и повышения ее функциональности, то это приводит к увеличению энергопотребления и тепловых потоков. Следствием указанных процессов является необходимость пересмотра системы перераспределения тепла и повышения излучения тепловой энергии в ОКП.

Одним из требований обеспечения нормального функционирования целевых и обеспечивающих систем космических аппаратов (КА) является поддержание их температурного режима в заданных пределах. Для выполнения требований нахождения температуры в пределах рабочего диапазона, а также с целью недопущения предельных значений изменения градиента температур [14] используются системы терморегулирования (СТР). Для регулирования температурного поля с помощью СТР на внешних поверхностях МКР КА применяются радиационные излучатели, терморегулирующие покрытия, а также экранно-вакуумная теплоизоляция [2, 9].

В результате внешнего воздействия происходит развитие поверхности излучения, в которой будут наблюдаться процессы переоблучения вновь образованных поверхностей (микротрещин, сколов и т. д.). Эти особенности необходимо учитывать при расчете суммарного теплового потока на радиационных излучателях и при обеспечении теплового режима функционирования КА.

Для повышения удельных характеристик [8] энергоизлучающих устройств в космическом пространстве обычно применяют способ увеличения площади излучаемой поверхности [4] и выбор определенных оптических характеристик. При расчетах тепловых потоков принимается во внимание взаимное расположение излучающих поверхностей. Вследствие особенностей, конструктивных и прочностных, при изготовлении радиаторов используется листовой материал с высокой теплопроводностью, чаще на основе алюминиевых сплавов. При этом не принимается во внимание возможность развития поверхности при сбросе тепловой энергии излучением, что в некоторых случаях позволяет снизить массу СТР [6].

Как известно, СТР классифицируются на активные и пассивные [3, 10, 12]. В зависимости от конструктивного исполнения КА и требований по температурному режиму функционирования бортовых и целевых систем формируется схема системы СТР. При этом МКР КА формата CubeSat в силу ограничения по энергетике проектируются с пассивной СТР с применением нагревателей для исключения снижения температур в область отрицательных значений (например, для литий-ионных АКБ). Применение системы пассивного терморегулирования также обусловлено нахождением средневитковой температуры в диапазоне значений 20–60 градусов [16]. Данный критерий оценки применимости пассивной СТР [14] позволяет обеспечить рабочий диапазон температур для радиоэлектронных компонентов, применяемых на МКР КА формата CubeSat.

Определяющими параметрами для излучателя являются: температура T , длина ребра L , высота ребра H , толщина ребра δ , коэффициент теплопроводности материала ребра λ_p , удельная излучательная способность ребра η . Удельная излучательная способность ребренного радиационного излучателя η [8, 13] представляет собой отношение отводимого теплового потока Q_p к такому тепловому потоку, который отводился бы при условии, что вся поверхность имела бы температуру T_0 основания радиационного излучателя (что соответствует бесконечно большой теплопроводности материала):

$$\eta = \frac{Q_p}{Q_{\max}(T_0)}. \quad (1)$$

В реальных системах взаимное облучение соседних ребер, а также несущей поверхности, на которой они закреплены, оказывает существенное влияние на перенос тепла [16]. Теплообмен излучением между ними описывается двумя методами: методом многократных отражений и методом сальдо [1, 5, 13].

Рассмотрим радиационный излучатель системы СТР с различными ребрами на поверхности.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОРЕБРЕНИЯ РАДИАТОРОВ НА ИХ ИЗЛУЧАТЕЛЬНУЮ СПОСОБНОСТЬ

Тепловая мощность, излучаемая единичной плоской поверхностью, имеющей температуру $T_{\text{и}}$, с учетом влияния внешнего суммарного теплового потока $q_{\Sigma}^{\text{погл}}$ будет составлять

$$\bar{q}_{\text{и}} = \varepsilon \sigma T_{\text{и}}^4 - q_{\text{а}}^{\text{погл}} = \varepsilon \sigma T_{\text{и}}^4 \left(1 - \frac{\bar{q}_{\Sigma}^{\text{погл}}}{T_{\text{и}}^4} \right),$$

где $\bar{q}_{\Sigma}^{\text{погл}}$ – параметр окружающей среды, $\bar{q}_{\Sigma}^{\text{погл}} = \frac{q_{\Sigma}^{\text{погл}}}{\varepsilon \sigma}$.

Задача о распространении тепла в ребрах (или шипах) рассматривается при следующих допущениях [16]:

- а) процесс стационарен;
- б) теплопроводность материала ребра постоянна;
- в) внутренние источники тепла отсутствуют;
- г) температуры в основании ребра и окружающей среды постоянны;
- д) толщина ребра мала по сравнению с его высотой, в связи с чем температурными градиентами поперек ребра (по толщине) можно пренебречь;
- е) постоянство степени черноты поверхности ребра.

Согласно закону теплопроводности Фурье, изменение теплового потока, проходящего через элементарный объем (рис. 1) с учетом изменения толщины ребра, составит

$$dQ'_{Т.Т} - dQ''_{Т.Т} = \frac{d}{dH} \left(\lambda_p \delta dL \frac{dT}{dH} \right) dH = \left(\delta \frac{d^2 T}{dH^2} + \frac{d\delta}{dH} \frac{dT}{dH} \right) \lambda_p dL dH,$$

где λ_p – коэффициент теплопроводности материала ребра;

δ – толщина ребра.

Тепловая мощность излучается наружными гранями элементарного объема

$$dQ'_{и.т} - dQ''_{и.т} = m \varepsilon_p \sigma T^4 \left(1 - \frac{\bar{q}_{\Sigma}^{погл}}{T^4} \right) dL dH, \quad (2)$$

где m – число излучающих граней;

$\bar{q}_{\Sigma}^{погл}$ – падающее на ребро излучение внешнего пространства.

Приравняв правые части уравнений и делая преобразования, получим следующее уравнение:

$$\delta \frac{d^2 T}{dH^2} + \frac{dT}{dH} \frac{d\delta}{dH} = \frac{m \varepsilon_p \sigma T^4}{\lambda_p} \left(1 - \frac{\bar{q}_{\Sigma}^{погл}}{T^4} \right). \quad (3)$$

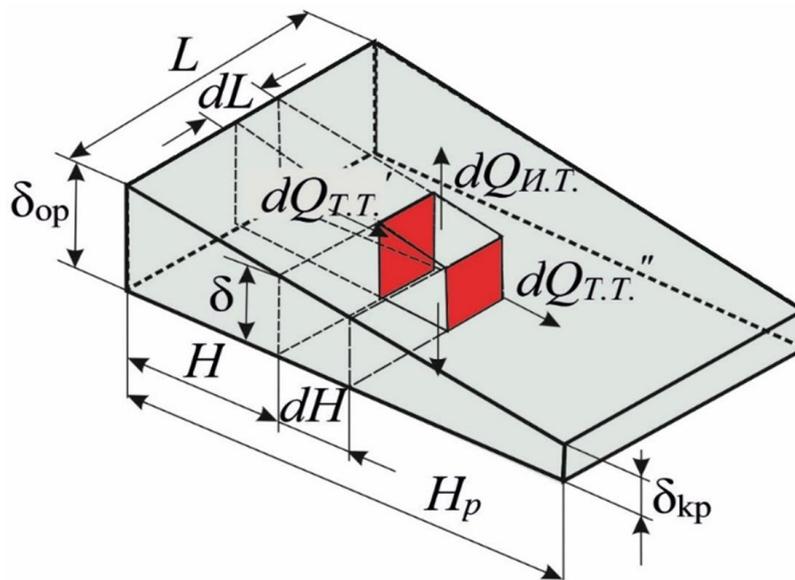


Рис. 1. Расчетная схема элемента ребра [8]

Введем безразмерные параметры: $\bar{H} = \frac{H}{H_p}$; $\bar{T} = \frac{T}{T_{o.p}}$; $\bar{\delta} = \frac{\delta}{\delta_{o.p}}$, с их учетом уравнение (3)

приобретает следующий вид:

$$\bar{\delta} \frac{d^2 \bar{T}}{d\bar{H}^2} + \frac{d\bar{T}}{d\bar{H}} \frac{d\bar{\delta}}{d\bar{H}} = C \left(\bar{T}^4 - \frac{\bar{q}_{\Sigma}^{погл}}{T_{o.p}^4} \right), \quad (4)$$

где C – безразмерный комплекс, определяемый выражением

$$C = \frac{m\varepsilon_p \sigma T_{o,p}^3 H_p^2}{\lambda_p \delta_{o,p}}. \quad (5)$$

Комплекс (5) называется параметром проводимости ребра. Полученное нелинейное дифференциальное уравнение второго порядка определяет закон изменения температуры по высоте ребра $\bar{T} = f(\bar{H})$ при заданных функции $\bar{\delta}(\bar{H})$, значениях C и $\frac{\bar{q}_{\Sigma}^{\text{погл}}}{T_{o,p}^4}$.

Для учета переоблучения оребренной поверхности, показанной на рис. 2, $q_{\Sigma}^{\text{погл}}$ необходимо рассмотреть как сумму падающих потоков от внешнего пространства и потоков излучения от соседних поверхностей, а именно базовой поверхности и поверхности соседнего ребра (рис. 2).

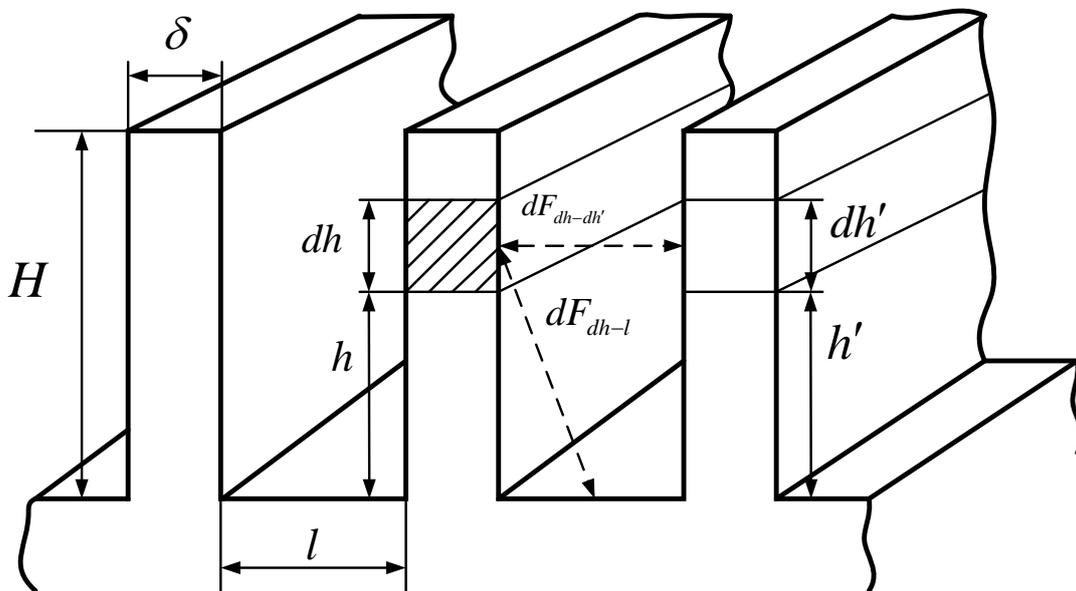


Рис. 2. Схема оребренной поверхности радиационного излучателя

В этом случае

$$q_{\Sigma}^{\text{погл}} = \varepsilon(q^{\text{внеш}} + q_{dh-dh'} + q_{dh-l}),$$

где q_{dh-l} – тепловой поток от базовой поверхности;

$q_{dh-dh'}$ – тепловой поток от поверхности соседнего ребра.

Результирующий тепловой поток двух бесконечно малых поверхностей, имеющих температуры T_i и T_j , находим по формуле [1, 5]

$$dQ_{ij} = dQ_{i \rightarrow j} - dQ_{j \rightarrow i}.$$

Тепловой поток $dQ_{i \rightarrow j}$, который излучает площадка dF_i в направлении площадки dF_j (рис. 2), из соотношения для яркости излучения определяется следующим образом:

$$dQ_{i \rightarrow j} = B_{ij} \cdot d\Omega dF \cos \varphi,$$

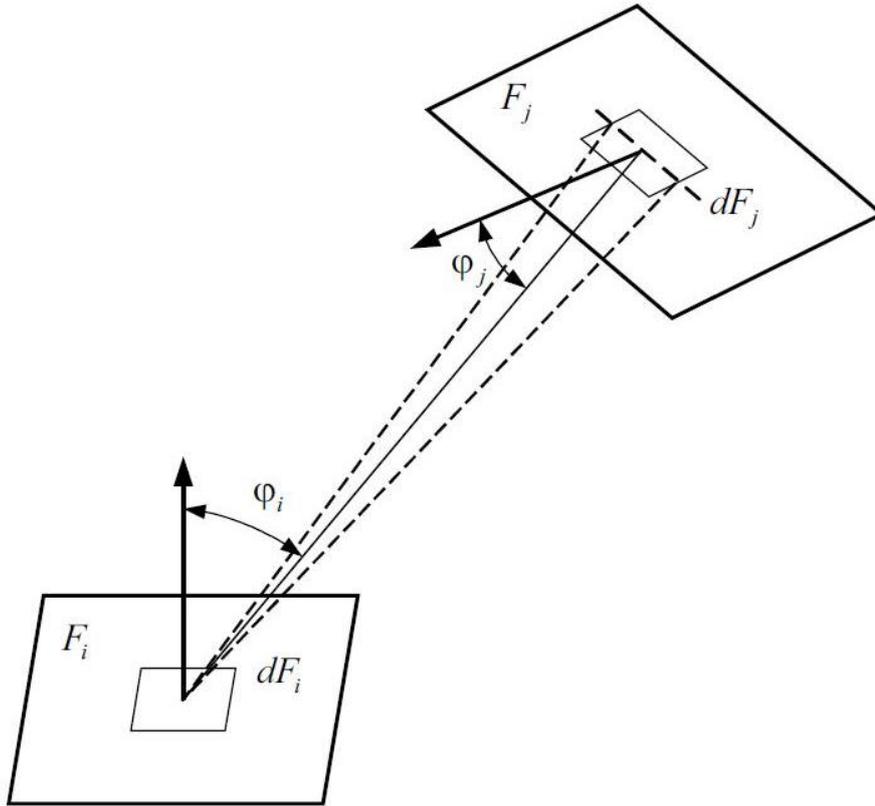


Рис. 3. Геометрическая схема определения углового коэффициента между элементарными площадками

где $dQ_{i \rightarrow j}$ – элементарный поток излучения, Вт;

$d\Omega$ – элементарный телесный угол, ср;

dF – элементарная площадка, м²;

φ – угол между направлением излучения и нормалью к площадке dF .

Для двух конечных площадей коэффициент видимости (облученности) задается отношениями:

$$\varphi_{ij} = \frac{1}{F_i} \int_{F_i} \int_{F_j} \frac{\cos \varphi_i \cos \varphi_j}{\pi R_{ij}^2} dF_i dF_j,$$

$$\varphi_{ji} = \frac{1}{F_j} \int_{F_j} \int_{F_i} \frac{\cos \varphi_i \cos \varphi_j}{\pi R_{ij}^2} dF_i dF_j,$$

где φ_i и φ_j представляют собой углы между единичными нормальными к площадкам, а линия R_{ij} соединяет эти две площадки.

Расчетное соотношение для лучистого потока между двумя площадками запишется следующим образом:

$$Q_{12} = \sigma_0 \varepsilon_{\text{пр}} (T_1^4 - T_2^4) F_1 \varphi_{12} = \sigma_0 \varepsilon_{\text{пр}} (T_1^4 - T_2^4) F_2 \varphi_{21},$$

где $\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведенная степень черноты системы, при этом

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \varphi_{21} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}.$$

Рассмотрим поверхность излучения с различными типами ребер, представленных на рис. 4.

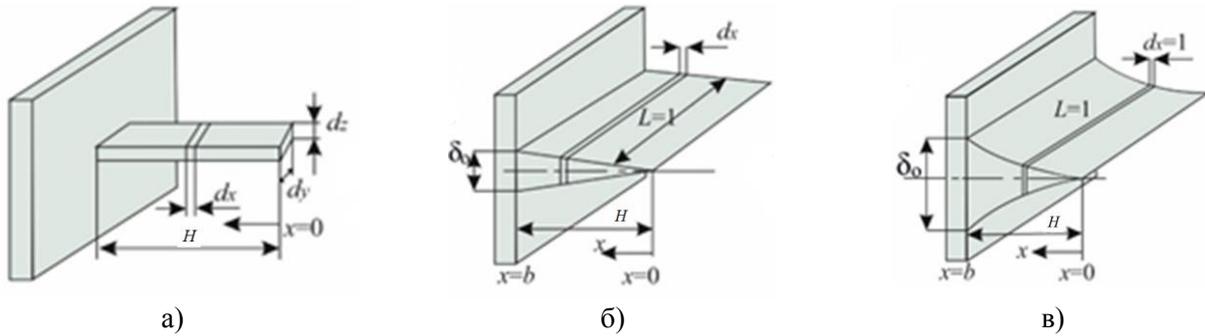


Рис. 4. Конструктивный вид элементов развитой поверхности:
 а – прямоугольный тип; б – продольное ребро треугольного профиля;
 в – продольное ребро вогнутого параболического профиля

Уравнение распространения тепла в излучающих ребрах имеет вид

$$\frac{d}{dy} \left(\lambda f_y \frac{dT}{dy} \right) = \varepsilon \sigma (T^4 - T_e^4) \quad (6)$$

или

$$f_1(x) \frac{d^2 T}{dy^2} + \frac{df_1(x)}{dx} \frac{dT}{dx} = \frac{\varepsilon \sigma}{\lambda} (T^4 - T_e^4).$$

Заменяв функцию поперечного сечения для единицы длины ребра $f_1(x)$ ($L=1$) функцией толщины (профиля) ребра $2Lf_1(x) = f_2(x)$, получим

$$2f_2(x) \frac{d^2 T}{dy^2} + \frac{2df_1(x)}{dx} \frac{dT}{dx} = \frac{\varepsilon \sigma}{\lambda} (T^4 - T_e^4). \quad (7)$$

Для ребра прямоугольного профиля (рис. 4,а) контур (функция) профиля такого ребра имеет вид:

$$f_2(x) = \frac{\delta}{2}; \quad \frac{df_2(x)}{dx} = 0.$$

Основное дифференциальное уравнение теплопроводности для ребра прямоугольного профиля будет иметь вид

$$\lambda \delta \frac{d^2 T}{dx^2} = \varepsilon \sigma T^4.$$

Для треугольного ребра (рис. 4,б) толщина изменяется по закону

$$f_2(x) = \frac{\delta_0 x}{2H}; \quad \frac{df_2(x)}{dx} = \frac{\delta_0}{2H}.$$

Для ребра вогнутого параболического профиля (рис. 4,в) толщина изменяется по закону

$$f_2(x) = \frac{\delta_0}{2} \left(\frac{x}{H} \right)^2; \quad \frac{df_2(x)}{dx} = \frac{\delta_0}{H} \frac{x}{H}.$$

Современные средства моделирования позволяют оперативно получить результаты моделирования для широкого диапазона видов моделей и начальных условий рассматриваемых

процессов. При этом результаты моделирования адекватно отображают характер протекаемых процессов с приемлемой точностью. На рис. 5 показан пример полей температур для двух вариантов оребрения радиационной поверхности. Приведенные результаты расчета тепловых характеристик ребер, полученные средствами автоматизированного моделирования, соответствуют значениям, полученным численным методом [7].

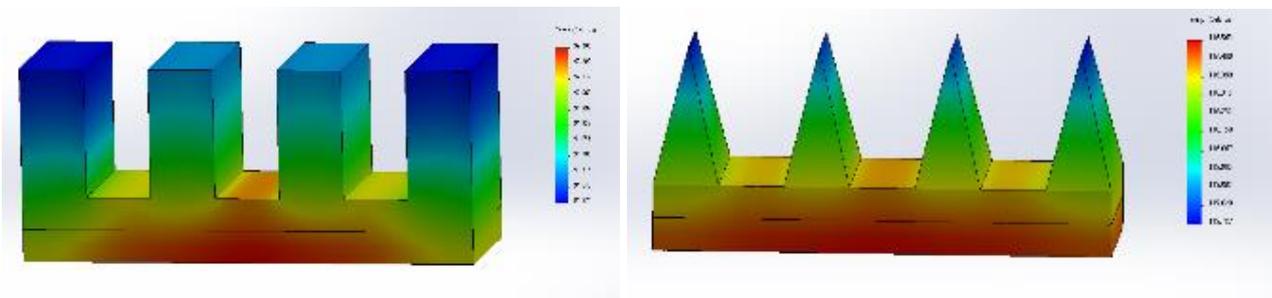


Рис. 5. Пример результатов расчета поля температур радиационных излучателей с ребрами разной конфигурации

По результатам моделирования произведен расчет удельной излучательной способности ребер по формуле (1).

В соответствии с полученными значениями построен график, изображенный на рис. 6.

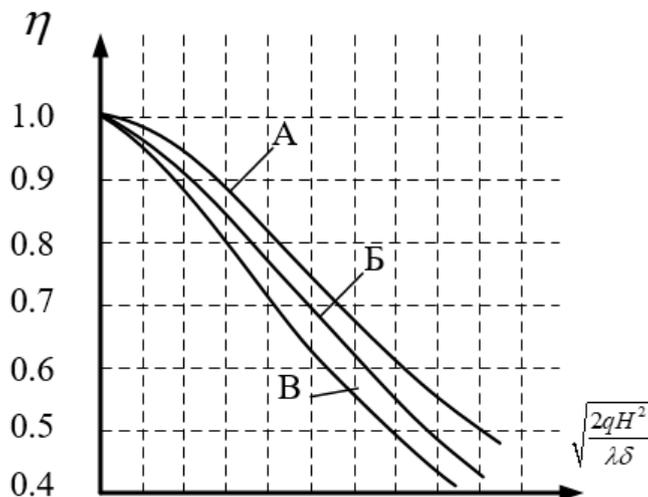


Рис. 6. Удельная излучательная способность продольных ребер: прямоугольного (А); треугольного (Б) и вогнутого (В)

В соответствии с результатами расчетов, представленными на графике (рис. 6), видно, что конфигурация ребра оказывает влияние на его удельную характеристику. Наибольшее значение отводимого теплового потока достигается при прямоугольной конфигурации ребра.

Сравнительный анализ результатов показывает, что использование ребра трапецевидного профиля (треугольного, параболического и др.) позволяет уменьшить его массу (сечение) по сравнению с ребром прямоугольного профиля до 48% при заданном отводимом тепловом потоке. Пример применения развитой оребренной радиационной поверхности в СТР МКР КА представлен на рис. 7.

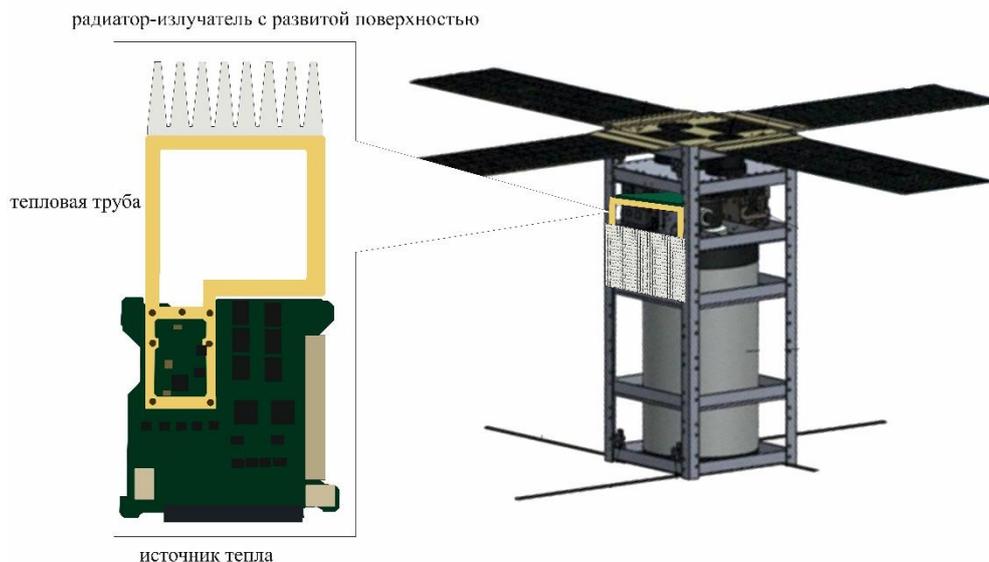


Рис. 7. Пример применения радиатора-излучателя с развитой поверхностью на МКР КА

В случае, если ряд ребер является бесконечным, то нельзя получить никакой выгоды, присоединяя ребра к черной поверхности основания, поскольку никакая поверхность не может испускать больше энергии, чем черная [5].

Если поверхности черные, а λ имеет конечное значение, то тепловой поток, рассеиваемый оребренной поверхностью, будет меньше, чем гладкой. Для серых поверхностей с $\varepsilon < 1$ ребра бесконечной теплопроводности будут всегда увеличивать поток тепла с поверхности, и это будет справедливо в некотором диапазоне конечной теплопроводности. Таким образом, использование ребер может быть целесообразно лишь при малых значениях толщины ребра и достаточно высоких значениях λ .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение оребренных поверхностей позволяет в ряде случаев существенно увеличить отводимый тепловой поток, что делает возможным в перспективе решать задачи, связанные с увеличением теплоотведения на борту МКР КА, характеризующихся ограниченными площадями поверхности корпуса. Предложенная в работе модель теплообмена развитой радиационной поверхности применительно к МКР КА позволяет оценивать результативность рассматриваемых отдельных технических решений и осуществлять выбор оребренных поверхностей, соответствующих заданным критериям, что действительно важно при обосновании параметров СТР и технического облика МКР КА в целом.

Список используемых источников

1. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике : учебник для авиационных специальностей вузов / В. С. Авдусевский [и др.]. – М. : Машиностроение, 1992. – 528 с.
2. Проектирование системы обеспечения теплового режима модуля аккумуляторных батарей наноспутника формата CubeSat / Е. А. Болтов [и др.] // Космические аппараты и технологии. – 2022. – № 1(39), т. 6. – С. 29–37.

3. *Гридин С. Н.* Особенности работы системы обеспечения теплового режима автоматического космического аппарата // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2015. – Т. 1. – С. 90–92.
4. *Зарубин В. С., Пешкова М. А.* Оптимизация параметров излучающей оребренной трубы // Вестник Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана. Сер. : Естественные науки. – 2007. – № 3.
5. *Зигель Р., Хауэлл Дж.* Теплообмен излучением : пер. с англ. – М. : Мир, 1975. – 934 с.
6. *Квашонкин И. А.* Системы терморегулирования малых космических аппаратов : научно-техн. обзор. – 2006, КБ «Арсенал». – 129 с.
7. *Керн Д., Краус А.* Развитые поверхности теплообмена. – М. : Энергия, 1977. – 464 с.
8. *Куландин А. А., Тимашев С. В.* Теория энергетических и двигательных установок космических аппаратов. – Л. : ВИКА им. А. Ф. Можайского, 1977. – 196 с.
9. *Кухтин А. В., Денисов А. М., Девяткина Т. Ю.* Практические рекомендации по разработке системы обеспечения теплового режима космического аппарата // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2018. – Вып. 11. – С. 113–123.
10. *Крушенко Г. Г., Голованова В. В.* Совершенствование системы терморегулирования космических аппаратов // Вестник СибГАУ. – 2014. – № 3(55). – С. 185–189.
11. Модель космоса : [научно-информац. изд.] : в 2 т. / под ред. М. И. Панасюка, Л. С. Новикова. – М. : КДУ, 2007. – Т. 2 : Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. – 1144 с.
12. Нестационарные тепловые режимы космических аппаратов спутниковых систем : моногр. / М. В. Краев [и др.]. – Красноярск : Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, 2004. – 282 с.
13. *Оцисик М. Н.* Сложный теплообмен : пер. с англ. – М. : Мир, 1976. – 615 с.
14. *Чеботарев В. Е., Косенко В. Е.* Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения : учеб. пособие. – Красноярск : Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, 2011. – 488 с.
15. *Полежаев Ю. В., Юревич Ф. Б.* Тепловая защита / под ред. А. В. Лыкова. – М. : Энергия, 1976. – 392 с.
16. *Ройзен Л. И., Дулькин И. Н.* Тепловой расчет оребренных поверхностей / под ред. В. Г. Фастовского. – М. : Энергия, 1977. – 254 с.

Р. А. Винокуров;
С. А. Власов,
кандидат технических наук, доцент;
А. Е. Егоров;
И. Ю. Кубасов,
кандидат технических наук

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАИБОЛЬШЕГО РАЗРЫВА ВО ВРЕМЕНИ НАБЛЮДЕНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТАХ БАЛЛИСТИЧЕСКИХ СТРУКТУР ОРБИТАЛЬНЫХ ГРУППИРОВОК КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ГЛОБАЛЬНОГО ПЕРИОДИЧЕСКОГО ОБЗОРА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

Для обеспечения преимущественных требований по разрыву во времени наблюдения для орбитальных группировок (ОГ) космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) ширина полосы обзора бортовой аппаратуры (БА) должна быть равна межвитковому расстоянию. Выполнение этого требования для КА с БА, у которой ширина полосы обзора меньше межвиткового расстояния, возможно путем формирования совместной полосы обзора нескольких КА.

В статье приводится решение задачи расчета наибольшего разрыва во времени наблюдения точек всей земной поверхности для различных вариантов баллистических структур ОГ КА с БА, у которой ширина полосы обзора меньше межвиткового расстояния.

Ключевые слова: межвитковое расстояние, дистанционное зондирование, совместная полоса обзора, орбитальная группировка, наибольший разрыв во времени наблюдения, космический аппарат.

ВВЕДЕНИЕ

При выборе способа орбитального построения ОГ КА ДЗЗ важнейшей характеристикой при периодическом обзоре является ширина полосы обзора, формируемая бортовой аппаратурой на поверхности Земли. Вместе с тем наблюдение с точки зрения величины разрывов во времени наблюдения обеспечивается наилучшим образом, когда ширина полосы обзора равна межвитковому расстоянию между соседними восходящими (нисходящими) узлами трассы полета КА. При такой ширине полосы обзора возможно наблюдение одним КА любых точек поверхности Земли не менее 2 раз в сутки при наклонении орбиты, обеспечивающим глобальный обзор.

Однако, в ряде случаев, бортовая аппаратура КА не обеспечивает ширину полосы обзора, равную межвитковому расстоянию (например, при оптико-электронном наблюдении или при использовании малых КА ДЗЗ, на бортовую аппаратуру которых накладываются массогабаритные ограничения). В данном случае необходимо использовать такие способы расположения КА в пространстве, когда формируемая их бортовой аппаратурой совместная полоса обзора будет равна межвитковому расстоянию. Для этого может использоваться так называемая фронтальная группа КА [1–3], когда КА располагают на соседних орбитах таким образом, чтобы их подспутниковые точки находились на одной параллели. Или можно применить способ, когда КА ОГ расположены в одной плоскости равномерно [4]. Тогда совместная полоса обзора образуется за счет сдвига их трасс полета.

Используя указанные способы, можно создавать ОГ КА с требуемым наибольшим временем разрыва в наблюдении. При этом возможны следующие варианты орбитального построения ОГ:

– с использованием фронтальной группы КА с совместной полосой обзора БА, ширина которой равна межвитковому расстоянию;

- с использованием плоскостной группы КА с совместной полосой обзора БА, ширина которой равна межвитковому расстоянию;
- с использованием изомаршрутных групп КА с размещением КА на одной трассе полета квазисинхронной орбиты при минимальном расстоянии между узлами трассы, равным ширине полосы одного КА;
- с применением комбинированных групп КА с использованием изомаршрутного построения на квазисинхронных орбитах при минимальном расстоянии между узлами трассы, превышающем ширину полосы обзора БА одного КА; при этом КА группируются в несколько фронтальных или плоскостных групп, обеспечивающих совместную ширину полосы, которая равна минимальному расстоянию между узлами трассы полета.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ РАСЧЕТА НАИБОЛЬШЕГО РАЗРЫВА ВО ВРЕМЕНИ НАБЛЮДЕНИЯ

Пусть в ОГ КА находится n КА. Ширина полосы обзора БА КА на экваторе ($\Delta\lambda'_3$) одинакова у всех КА и составляет n -ю часть от межвиткового расстояния ($\Delta\lambda_{\text{мв}}$) между соседними восходящими (нисходящими) узлами трассы полета КА ($\Delta\lambda'_3 = \Delta\lambda_{\text{мв}}/n$).

Орбиты всех КА – круговые, одинаковых радиусов и наклонов. Наклонение орбит близко к полярному, а полоса обзора БА при этом обеспечивает покрытие полюсов Земли, т. е. обеспечивается глобальный обзор.

Необходимо рассчитать наибольший разрыв во времени наблюдения всех точек земной поверхности для различных вариантов структуры ОГ КА, построенных с использованием:

- фронтальной группы КА с совместной полосой обзора БА КА, ширина которой на экваторе равна межвитковому сдвигу ($\Delta\lambda_3 = n\Delta\lambda'_3 = \Delta\lambda_{\text{мв}}$);
- плоскостной группы КА с совместной полосой обзора БА КА, ширина которой на экваторе равна межвитковому сдвигу ($\Delta\lambda_3 = n\Delta\lambda'_3 = \Delta\lambda_{\text{мв}}$);
- изомаршрутной группы КА с размещением КА на одной трассе полета квазисинхронной орбиты с минимальным расстоянием между узлами трассы полета ($\Delta\lambda_{\text{мин}}$), равному ширине полосы бортовой аппаратуры одного КА на экваторе ($\Delta\lambda_3 = \Delta\lambda'_3 = \Delta\lambda_{\text{мин}}$);
- комбинированной группы КА с применением изомаршрутного построения фронтальных или плоскостных групп на квазисинхронных орбитах с минимальным расстоянием между узлами трассы полета, превышающим ширину полосы бортовой аппаратуры одного КА на экваторе ($\Delta\lambda'_3 < \Delta\lambda_3 < \Delta\lambda_{\text{мв}}$).

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ РАСЧЕТА НАИБОЛЬШЕГО РАЗРЫВА ВО ВРЕМЕНИ НАБЛЮДЕНИЯ ТОЧЕК ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТАХ СТРУКТУР ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Для расчета наибольшего разрыва во времени наблюдения, когда ширина полосы обзора БА КА задана, зачастую используются зависимости, связывающие характеристики трассы полета (межвитковый сдвиг, восточный сдвиг и западный сдвиг трассы полета относительно рассматриваемого узла трассы) и число оборотов КА в эффективные сутки, которые определяют области разрыва во времени наблюдения [1].

Пусть число оборотов КА в эффективные сутки находится на произвольном интервале, определенном как

$$\frac{T_{\text{эф}}}{T_{\Omega}} \in (l_1, l_1 + 2],$$

- где T_{Ω} – драконический период обращения КА;
 $T_{\text{эф}}$ – эффективные сутки (время, за которое Земля совершит один оборот относительно восходящего узла орбиты КА);
 l_1 – нечетное целое число.

1. Определение разрыва во времени наблюдения для фронтальной группы КА с совместной полосой обзора шириной на экваторе $\Delta\lambda_3 = n\Delta\lambda'_3 = \Delta\lambda_{\text{мв}}$.

Как показано в работе [1], максимальный разрыв во времени наблюдения, обеспечиваемый фронтальной группой КА, будет равен наибольшему разрыву во времени наблюдения одного КА с шириной полосы обзора $\Delta\lambda'_3 = \Delta\lambda_{\text{мв}}$ и будет одинаковым по числу драконических периодов на всем интервале $\frac{T_{\text{эф}}}{T_{\Omega}} \in (l_1, l_1 + 2]$.

Следовательно, наибольший разрыв во времени наблюдения такой фронтальной группой КА будет определяться соотношением

$$\Delta t_n = \left(\frac{l_1 + 3}{2} \right) T_{\Omega}.$$

2. Определение разрыва во времени наблюдения для плоскостной группы КА с совместной полосой обзора БА, у которой ширина на экваторе равна межвитковому сдвигу $\Delta\lambda_3 = n\Delta\lambda'_3 = \Delta\lambda_{\text{мв}}$.

Пусть ОГ состоит из n КА, равномерно размещенных в одной орбитальной плоскости. За счет сдвига трассы полета КА образуется совместная полоса обзора шириной на экваторе, равной межвитковому расстоянию.

Как показано в статье [4], наибольший разрыв во времени наблюдения в рассматриваемом случае определяется по формуле

$$\Delta t_n = (k + 1) T_{\Omega},$$

где k – целое число сдвигов (укладывающихся в диапазоне долгот между первым восходящим и первым нисходящим узлами трассы полета) восходящих узлов трассы полета КА на ширину полосы обзора БА [4],

$$k = \left[\frac{n}{2} (l + m + 1) \right];$$

l – целая часть числа оборотов КА в сутки,

$$l = \left[\frac{T_{\text{эф}}}{T_{\Omega}} \right];$$

m – дробная часть числа оборотов КА в сутки,

$$m = \left\{ \frac{T_{\text{эф}}}{T_{\Omega}} \right\}.$$

Пусть $l = l_1$, тогда $k = \frac{n}{2} (l_1 + 1) + \left[\frac{nm}{2} \right]$.

Пусть $l = l_1 + 1$, тогда $k = \frac{n}{2} (l_1 + 1) + \left[\frac{n(m + 1)}{2} \right]$.

Используем восточный сдвиг между разноименными узлами трассы полета на экваторе [1], который определится как

$$\Delta\bar{\lambda}_{\text{вост}} = \frac{\Delta\lambda_{\text{вост}}}{\Delta\lambda_{\text{мв}}} = \begin{cases} \frac{m}{2}, & \text{если } l = l_1, \\ \frac{m+1}{2}, & \text{если } l = l_1 + 1, \end{cases}$$

тогда $k = \frac{n}{2}(l_1 + 1) + [n\Delta\bar{\lambda}_{\text{вост}}]$.

Пусть диапазон изменения числа оборотов в сутки $\frac{T_{\text{эф}}}{T_{\Omega}} \in (l_1, l_1 + 2]$ разбит на n интервалов.

Номер каждого интервала обозначается j , а $j = 1, 2, \dots, n$.

Пусть $[n\Delta\bar{\lambda}_{\text{вост}}] = j$, тогда

$$\frac{T_{\text{эф}}}{T_{\Omega}} = l + m = l_1 + 2\Delta\bar{\lambda}_{\text{вост}}$$

или

$$\frac{T_{\text{эф}}}{T_{\Omega}} = l_1 + \frac{2j}{n}.$$

Рассмотрим элементарный интервал

$$\frac{T_{\text{эф}}}{T_{\Omega}} \in \left(l_1 + \frac{2(j-1)}{n}, l_1 + \frac{2j}{n} \right].$$

На этом интервале $k = \frac{n}{2}(l_1 + 1) + j - 1$. Отсюда наибольший разрыв во времени наблюдения на данном интервале определится как

$$\Delta t_n = \left(\frac{l_1 + 1}{2} + \frac{j}{n} \right) T_{\Omega}.$$

При $j = n$ на последнем интервале $\frac{T_{\text{эф}}}{T_{\Omega}} \in \left(l_1 + \frac{2(n-1)}{n}, l_1 + 1 \right]$ разрыв во времени наблюдения определится как

$$\Delta t_n = \left(\frac{l_1 + 3}{2} \right) T_{\Omega}.$$

3. Определение разрыва во времени наблюдения для изомаршрутной ОГ КА с размещением КА на одной трассе полета квазисинхронной орбиты с минимальным расстоянием между узлами трассы полета, равным ширине полосы одного КА на экваторе $\Delta\lambda_s = \Delta\lambda'_s = \Delta\lambda_{\text{мин}}$.

Пусть диапазон изменения числа оборотов в сутки $\frac{T_{\text{эф}}}{T_{\Omega}} \in (l_1, l_1 + 2]$ разбит на n интервалов.

Номер каждого интервала обозначается j , а $j = 1, 2, \dots, n$.

При значениях числа оборотов в сутках

$$\frac{T_{\text{эф}}}{T_{\Omega}} = l_1 + \frac{2j}{n}$$

параметры квазисинхронной орбиты определяются как

$$\frac{T_{\text{эф}}}{T_{\Omega}} = \frac{p}{q} = \begin{cases} \frac{nl_1 + 2j}{n}, & \text{если } n - \text{нечетное;} \\ \frac{nl_1/2 + j}{n/2}, & \text{если } n - \text{четное,} \end{cases}$$

если в числителе и знаменателе находятся взаимно простые целые числа.

Наибольший разрыв во времени наблюдения при условии $\Delta\lambda_3 = \Delta\lambda'_3 = \Delta\lambda_{min}$ для таких орбит определится по формуле

$$\Delta t_n = \frac{\Delta t_1}{n} = \begin{cases} \frac{p+1}{2n} T_\Omega = \left(\frac{nl_1 + 2j + 1}{2n} \right) T_\Omega, & \text{если } n - \text{нечетное;} \\ \frac{pT_\Omega}{n} = \frac{nl_1/2 + j}{n}, & \text{если } n - \text{четное,} \end{cases}$$

где Δt_1 – наибольший разрыв в наблюдении одного КА (одной фронтальной или плоскостной группы) [1], или

$$\Delta t_n = \begin{cases} \left(\frac{l_1}{2} + \frac{j}{n} + \frac{1}{2n} \right) T_\Omega, & \text{если } n - \text{нечетное;} \\ \left(\frac{l_1}{2} + \frac{j}{n} \right) T_\Omega, & \text{если } n - \text{четное.} \end{cases}$$

4. Определение разрыва во времени наблюдения для комбинированного варианта построения ОГ КА с использованием изомаршрутного построения фронтальных или плоскостных групп на квазисинхронных орбитах с минимальным расстоянием между узлами трассы полета, превышающим ширину полосы одного КА на экваторе ($\Delta\lambda'_3 < \Delta\lambda_3 < \Delta\lambda_{MB}$).

При значениях числа оборотов в сутках $\frac{T_{эф}}{T_\Omega} = l_1 + \frac{2j}{n}$ параметры квазисинхронной орбиты определяются как

$$\frac{T_{эф}}{T_\Omega} = \begin{cases} \frac{nl_1 + 2j}{n}, & \text{если } n - \text{нечетное;} \\ \frac{nl_1/2 + j}{n/2}, & \text{если } n - \text{четное.} \end{cases}$$

Пусть в числителе и знаменателе числа не являются взаимно простыми целыми числами.

После сокращения дроби получим $\frac{T_{эф}}{T_\Omega} = \frac{p}{q}$, где p, q – взаимно простые целые числа.

Для обеспечения совместной полосы обзора во фронтальных или плоскостных группах потребуется n_2 КА.

Учитывая, что минимальное расстояние между узлами трассы полета определяется как [1]

$$\Delta\lambda_{min} = \begin{cases} \frac{\Delta\lambda_{MB}}{q}, & \text{если } p \cdot q - \text{нечетное;} \\ \frac{\Delta\lambda_{MB}}{2q}, & \text{если } p \cdot q - \text{четное,} \end{cases}$$

а величина $\Delta\lambda'_3 = \frac{\Delta\lambda_{MB}}{n}$, число КА – n_2 определится как

$$n_2 = \frac{\Delta\lambda_{min}}{\Delta\lambda'_3} = \begin{cases} \frac{n}{q}, & \text{если } p \cdot q - \text{нечетное;} \\ \frac{n}{2q}, & \text{если } p \cdot q - \text{четное.} \end{cases}$$

Пусть на трассе полета на интервале Δt_1 равномерно размещаются n_1 КА, причем

$$n_1 = \frac{n}{n_2} = \begin{cases} q, & \text{если } p \cdot q - \text{нечетное;} \\ 2q, & \text{если } p \cdot q - \text{четное.} \end{cases}$$

Следовательно, общее число КА в ОГ будет $n = n_1 \cdot n_2$.

Таким образом, параметры квазисинхронной орбиты определяются следующим образом:

$$\frac{T_{\text{эф}}}{T_{\Omega}} = \begin{cases} \frac{(nl_1 + 2j) \frac{n_1}{n}}{n \frac{n_1}{n}}, & \text{если } n - \text{нечетное;} \\ \frac{(nl_1/2 + j) \frac{n_1}{n}}{\frac{n}{2} \frac{n_1}{n}}, & \text{если } n - \text{четное;} \end{cases}$$

либо

$$\frac{T_{\text{эф}}}{T_{\Omega}} = \frac{p}{q} = \begin{cases} \frac{\left(n_1 l_1 + \frac{2j}{n_2} \right)}{n_1}, & \text{если } n - \text{нечетное;} \\ \frac{\left(n_1 \frac{l_1}{2} + \frac{j}{n_2} \right)}{\frac{n_1}{2}}, & \text{если } n - \text{четное.} \end{cases}$$

Наибольший разрыв во времени наблюдения в случаях нечетного и четного значений числа КА n определится следующим образом.

Если число КА n – нечетное, то и произведение $p \cdot q$ – нечетное, так как $n_1 l_1 + 2j$ – нечетное, $n_1 = q$.

Таким образом, параметры квазисинхронной орбиты с числом оборотов в сутки найдем как

$$\frac{T_{\text{эф}}}{T_{\Omega}} = \frac{(nl_1 + 2j) \frac{q}{n}}{n \frac{q}{n}} = \frac{(nl_1 + 2j) \frac{n_1}{n}}{n \frac{n_1}{n}}$$

или

$$\frac{T_{\text{эф}}}{T_{\Omega}} = \frac{\left(n_1 l_1 + \frac{2j}{n_2} \right)}{n_1}.$$

Следовательно, наибольший разрыв в наблюдении будет составлять

$$\Delta t_n = \frac{p+1}{2n_1} T_{\Omega} = \left(\frac{n_1 l_1 + 2 \frac{j}{n_2} + 1}{2n_1} \right) T_{\Omega}$$

или

$$\Delta t_n = \left(\frac{l_1}{2} + \frac{j}{n} + \frac{1}{2n_1} \right) T_{\Omega}.$$

На интервале числа оборотов КА в сутках $\frac{T_{\text{эф}}}{T_{\Omega}} \in \left(l_1, l_1 + \frac{2(n-1)}{n} \right]$, когда $j < n$, максимальная величина наибольшего разрыва во времени наблюдения точек поверхности Земли обеспечивается при $n_1 = 3$ и будет составлять

$$\Delta t_n = \left(\frac{l_1}{2} + \frac{j}{n} + \frac{1}{6} \right) T_{\Omega}.$$

Минимальная величина наибольшего разрыва во времени наблюдения точек поверхности Земли обеспечивается при $n_1 = n$ и будет определяться выражением

$$\Delta t_n = \left(\frac{l_1}{2} + \frac{j}{n} + \frac{1}{2n} \right) T_{\Omega}$$

На последнем интервале числа оборотов в сутках $\frac{T_{\text{эф}}}{T_{\Omega}} \in \left(l_1 + \frac{2(n-1)}{n}, l_1 + 2 \right]$, когда $j = n$,

$\frac{T_{\text{эф}}}{T_{\Omega}} = \frac{l_1 + 2}{1}$, $q = 1$, $\Delta \lambda_{\text{мин}} = \Delta \lambda_{\text{мв}}$, разрыв во времени наблюдения составит

$$\Delta t_n = \left(\frac{l_1 + 3}{2} \right) T_{\Omega}.$$

Таким образом, разрыв во времени наблюдения на этом интервале будет равен наибольшему разрыву во времени наблюдения фронтальной или плоскостной группы КА.

Если число КА n – четное, то произведение $p \cdot q$ может быть и нечетным и четным.

Если произведение $p \cdot q$ – нечетное, то $n_1 = q$.

Параметры квазисинхронной орбиты определяются как

$$\frac{T_{\text{эф}}}{T_{\Omega}} = \frac{(nl_1/2 + j) \frac{2q}{n}}{\frac{n}{2} \frac{2q}{n}} = \frac{(nl_1/2 + j) \frac{2n_1}{n}}{\frac{n}{2} \frac{2n_1}{n}}$$

или

$$\frac{T_{\text{эф}}}{T_{\Omega}} = \frac{\left(n_1 l_1 + \frac{2j}{n_2} \right)}{n_1}.$$

Если произведение $p \cdot q$ – нечетное, то наибольший разрыв в наблюдении

$$\Delta t_n = \frac{p+1}{2n_1} T_{\Omega} = \left(\frac{n_1 \frac{l_1}{2} + \frac{j}{n_2} + 1}{2n_1} \right) T_{\Omega}$$

или

$$\Delta t_n = \left(\frac{l_1}{2} + \frac{j}{n} + \frac{1}{2n_1} \right) T_{\Omega},$$

что совпадает со случаем нечетного числа n .

Если произведение $p \cdot q$ – четное, то $n_1 = 2q$.

Параметры квазисинхронной орбиты определяются как

$$\frac{T_{\text{эф}}}{T_{\Omega}} = \frac{(nl_1/2 + j) \frac{2q}{n}}{\frac{n \cdot 2q}{2 \cdot n}} = \frac{(nl_1/2 + j) \frac{n_1}{n}}{\frac{n \cdot n_1}{2 \cdot n}},$$

или

$$\frac{T_{\text{эф}}}{T_{\Omega}} = \frac{\left(n_1 \frac{l_1}{2} + \frac{j}{n_2} \right)}{\frac{n_1}{2}}.$$

Наибольший разрыв во времени наблюдения будет следующим:

$$\Delta t_n = \frac{p}{n_1} T_{\Omega} = \left(\frac{n_1 \frac{l_1}{2} + \frac{j}{n_2}}{n_1} \right) T_{\Omega}$$

или

$$\Delta t_n = \left(\frac{l_1}{2} + \frac{j}{n} \right) T_{\Omega}.$$

Разрыв в наблюдении будет одинаков при всех вариантах квазисинхронных орбит, у которых произведение $p \cdot q$ – четное.

СРАВНЕНИЕ НАИБОЛЬШЕГО РАЗРЫВА ВО ВРЕМЕНИ НАБЛЮДЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТАХ СТРУКТУР ОРБИТАЛЬНЫХ ГРУППИРОВОК КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Сравнительный анализ наибольших разрывов во времени наблюдения при различных вариантах структур ОГ КА удобно провести на одном и том же диапазоне изменения числа оборотов КА в эффективные сутки $\frac{T_{\text{эф}}}{T_{\Omega}} \in (l_1, l_1 + 2]$. При этом изомаршрутные ОГ КА с размещением КА на одной трассе полета квазисинхронной орбиты можно объединить с комбинированным вариантом с использованием изомаршрутного построения фронтальных или плоскостных групп, полагая числа $n_1 = n$ и $n_2 = 1$.

Анализ наибольших разрывов во времени наблюдения точек поверхности Земли показывает следующее.

Для ОГ КА, формируемых с использованием фронтальных групп с совместной полосой обзора БА $\Delta\lambda_3 = n\Delta\lambda'_3 = \Delta\lambda_{\text{мв}}$, наибольший разрыв во времени наблюдения точек всей земной поверхности будет составлять

$$\Delta t_n = \left(\frac{l_1 + 3}{2} \right) T_{\Omega}.$$

Для ОГ КА, формируемых с использованием плоскостной группы с совместной полосой обзора БА $\Delta\lambda_3 = n\Delta\lambda'_3 = \Delta\lambda_{\text{мв}}$ на интервале $\frac{T_{\text{эф}}}{T_{\Omega}} \in \left(l_1 + \frac{2(j-1)}{n}, l_1 + \frac{2j}{n} \right]$, где $j = 1, 2, \dots, n-1$,

наибольший разрыв во времени наблюдения точек всей земной поверхности будет составлять

$$\Delta t_n = \left(\frac{l_1 + 1}{2} + \frac{j}{n} \right) T_\Omega.$$

При $j = n$ на последнем интервале $\frac{T_{\text{эф}}}{T_\Omega} \in \left(l_1 + \frac{2(n-1)}{n}, l_1 + 1 \right]$ разрыв во времени наблюдения

$$\Delta t_n = \left(\frac{l_1 + 3}{2} \right) T_\Omega$$

совпадает с наибольшим разрывом во времени наблюдения ОГ КА, построенной с использованием фронтальной группы КА. В остальных интервалах разрыв во времени наблюдения будет меньше.

Для ОГ КА, построенных по комбинированному варианту с использованием изомаршрутного построения фронтальных или плоскостных групп на квазисинхронных орбитах, для которых

$$\frac{T_{\text{эф}}}{T_\Omega} = \begin{cases} \frac{\left(n_1 l_1 + \frac{2j}{n_2} \right)}{n_1}, & \text{если } n - \text{нечетное;} \\ \frac{\left(n_1 \frac{l_1}{2} + \frac{j}{n_2} \right)}{\frac{n_1}{2}}, & \text{если } n - \text{четное.} \end{cases}$$

с минимальным расстоянием между узлами трассы КА, которое не превышает ширину полосы БА одного КА на экваторе ($\Delta \lambda_{\min} \leq \Delta \lambda'_s \leq \Delta \lambda_s \leq \Delta \lambda_{\max}$), максимальный разрыв во времени наблюдения точек всей земной поверхности определяется в зависимости от числа n и произведения чисел $p \cdot q$.

При нечетном числе n и при четном числе n , если произведение $p \cdot q$ – нечетное, ОГ КА обеспечивает максимальный разрыв во времени наблюдения точек всей земной поверхности

$$\Delta t_n = \left(\frac{l_1}{2} + \frac{j}{n} + \frac{1}{2n_1} \right) T_\Omega.$$

При $j < n$ разрыв во времени наблюдения находится в интервале

$$\Delta t_n \in \left(\left(\frac{l_1}{2} + \frac{j}{n} + \frac{1}{2n} \right) T_\Omega, \left(\frac{l_1}{2} + \frac{j}{n} + \frac{1}{6} \right) T_\Omega \right).$$

При $j = n$ разрыв во времени наблюдения составляет $\Delta t_n = \left(\frac{l_1 + 3}{2} \right) T_\Omega$.

При четном числе n и четном произведении $p \cdot q$ обеспечивается максимальный разрыв во времени наблюдения точек всей земной поверхности, который будет составлять

$$\Delta t_n = \left(\frac{l_1}{2} + \frac{j}{n} \right) T_\Omega.$$

Обозначим разность наибольших разрывов во времени наблюдения точек всей земной поверхности следующим образом: между фронтальной группой и плоскостной группой КА – δt_1 , между плоскостной группой и изомаршрутной или комбинированной группой при чет-

ном числе n и $p \cdot q$ четном – δt_2 , между плоскостной группой и изомаршрутной или комбинированной группой при нечетном $p \cdot q$ – δt_3 .

На интервале числа оборотов в сутках $\frac{T_{\text{эф}}}{T_{\Omega}} \in \left(l_1 + \frac{2(j-1)}{n}, l_1 + \frac{2j}{n} \right]$, где $j=1, 2, \dots, n-1$, раз-

ность наибольших разрывов во времени наблюдения точек всей земной поверхности между ОГ КА, построенных с использованием фронтальной группы и плоскостной группы, составляет величину

$$\delta t_1 = \frac{n-j}{n} T_{\Omega}.$$

Разность наибольших разрывов во времени наблюдения точек всей земной поверхности, определяемой между ОГ КА, которые построены с использованием плоскостной группы и изомаршрутной или комбинированной группы при четном числе n и $p \cdot q$ – четном, составляет величину

$$\delta t_2 = \frac{T_{\Omega}}{2},$$

при нечетном $p \cdot q$ – величину

$$\delta t_3 = \frac{n_1-1}{2n_1} T_{\Omega} \leq \frac{T_{\Omega}}{3}.$$

На интервале числа оборотов в сутках $\frac{T_{\text{эф}}}{T_{\Omega}} \in \left(l_1 + \frac{2(n-1)}{n}, l_1 + 2 \right]$ наибольший разрыв во времени наблюдения одинаков для всех вариантов построения ОГ:

$$\Delta t_n = \frac{l_1+3}{2} T_{\Omega}.$$

Примеры относительных разрывов во времени наблюдения $\Delta t_n/T_{\Omega}$ для различных вариантов структур ОГ КА в произвольном диапазоне числа оборотов КА в эффективные сутки $\frac{T_{\text{эф}}}{T_{\Omega}} \in (l_1, l_1 + 2]$, где l_1 – нечетное целое число, для числа КА в ОГ $n=8$ представлены в табл. 1.

Таблица 1

Относительные разрывы во времени наблюдения для различных структур ОГ КА

j	1	2	3	4	5	6	7	8
$T_{\text{эф}}/T_{\Omega}$	$\frac{4l_1+1}{4}$	$\frac{2l_1+1}{2}$	$\frac{4l_1+3}{4}$	$\frac{l_1+1}{1}$	$\frac{4l_1+5}{4}$	$\frac{2l_1+3}{2}$	$\frac{4l_1+7}{4}$	$\frac{l_1+2}{1}$
$\Delta t_n/T_{\Omega}$ ФГ	$\frac{4l_1+12}{8}$							
$\Delta t_n/T_{\Omega}$ ПГ	$\frac{4l_1+5}{8}$	$\frac{4l_1+6}{8}$	$\frac{4l_1+7}{8}$	$\frac{4l_1+8}{8}$	$\frac{4l_1+9}{8}$	$\frac{4l_1+10}{8}$	$\frac{4l_1+11}{8}$	$\frac{4l_1+12}{8}$
$\Delta t_n/T_{\Omega}$ КГ	$\frac{4l_1+1}{8}$	$\frac{4l_1+2}{8}$	$\frac{4l_1+3}{8}$	$\frac{4l_1+4}{8}$	$\frac{4l_1+5}{8}$	$\frac{4l_1+6}{8}$	$\frac{4l_1+7}{8}$	$\frac{4l_1+12}{8}$

В табл. 1 обозначены примеры относительных разрывов во времени наблюдения $\Delta t_n / T_\Omega$: ФГ – для ОГ КА, построенных с использованием фронтальной группы КА; ПГ – для ОГ КА, построенных с использованием плоскостных групп КА; КГ – для ОГ КА, построенных с использованием изомаршрутного и комбинированного способа построения ОГ КА (при $j = 1, 3, 5, 7$ изомаршрутный способ, для остальных j – комбинированный). Для удобства анализа соотношения приведены к одному знаменателю.

Для ОГ КА, построенных с использованием фронтальной группы, наибольший разрыв во времени наблюдения остается одинаковым на всем интервале числа оборотов КА в эффективные сутки и имеет максимальное значение. На этом же интервале, за исключением правой границы (где $j = 8$), для ОГ КА, построенных с использованием плоскостной группы, разрыв во времени наблюдения меньше, чем для ОГ КА, построенных с использованием фронтальной группы, и он нарастает начиная от левой границы (где $j = 1$).

Минимальный наибольший разрыв во времени наблюдения в зависимости от интервала числа оборотов КА в эффективные сутки и способа построения может быть получен для ОГ КА, построенных с использованием изомаршрутного и комбинированного способа построения.

Для всех вариантов ОГ КА разрыв во времени наблюдения для случая правой границы выбранного интервала числа оборотов КА в эффективные сутки одинаков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, для улучшения периодичности наблюдения всей поверхности Земли ОГ КА ДЗЗ, БА которых имеет полосу обзора меньше межвиткового сдвига с использованием фронтальных и плоскостных групп КА, можно сформировать совместную полосу обзора БА шириной, равной межвитковому расстоянию. При использовании изомаршрутного и комбинированного способа построения ОГ КА совместная полоса обзора должна быть равна минимальному расстоянию между узлами трассы полета КА. Для всех способов построения ОГ КА обеспечивается наблюдение всей поверхности Земли дважды в сутки.

Величина разрыва во времени наблюдения зависит от высоты орбиты КА, которая, в свою очередь, зависит от числа оборотов КА в эффективные сутки. Результаты расчета наибольшего разрыва во времени наблюдения точек всей земной поверхности для различных способов построения ОГ КА показали, что минимальный наибольший разрыв во времени наблюдения может быть получен для ОГ КА, построенных с использованием изомаршрутного и комбинированного способа построения. Уменьшение наибольшего разрыва во времени наблюдения для этих способов приближает интервалы разрывов во времени наблюдения в течение суток к более равномерным значениям.

Значение разности наибольших разрывов во времени наблюдения всей поверхности Земли между ОГ КА, построенных с использованием плоскостной группы КА и изомаршрутной или комбинированной группы КА, составляет от одной трети до половины периода обращения КА.

Список используемых источников

1. Баллистические основы проектирования ракет-носителей и спутниковых систем / Н. Ф. Аверкиев [и др.]. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2017. – 302 с.
2. Власов С. А., Кубасов И. Ю., Селин В. А. Выбор баллистической структуры системы космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2010. – Вып. 625. – С. 76–80.

3. *Власов С. А., Кульвиц А. В., Киселев В. В.* Алгоритм расчета характеристик применения космических аппаратов для наблюдения объектов в околоземном космическом пространстве // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2014. – Вып. 645. – С. 88–92.

4. *Власов С. А., Кубасов И. Ю., Жаткин А. Т.* Решение задачи расчета наибольшего времени разрыва в наблюдении всей поверхности Земли при расположении космических аппаратов орбитальной группировки дистанционного зондирования Земли в одной плоскости // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2023. – Вып. 686. – С. 157–164.

Д. М. Вяльдин;
В. В. Лисицкий,
доктор технических наук, доцент

МОДЕЛЬ ОЦЕНИВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Разработана модель оценивания надежности информационно-измерительной системы в режиме реального времени, учитывающая проводимые мероприятия технической эксплуатации (технического обслуживания и восстановления). Данная модель, в отличие от известных, наиболее приближена к реальному техническому состоянию информационно-измерительной системы и позволяет повысить обоснованность решений по коррекции сроков и объемов проведения технического обслуживания и восстановления по результатам оценки технического состояния информационно-измерительной системы в данный момент времени эксплуатации.

Ключевые слова: модель оценивания надежности, коэффициент оперативной готовности, режим реального времени, техническое обслуживание, восстановление, информационно-измерительная система.

ВВЕДЕНИЕ

Информационно-измерительные системы (ИИС) играют важную роль в современных технологических процессах, обеспечивая сбор, обработку и передачу данных в режиме реального времени. Поддержание требуемой надежности таких систем является ключевым фактором для обеспечения безопасности и эффективности работы.

В соответствии с документом [1] под надежностью понимается свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность объекта выполнять требуемые функции в заданных режимах, условиях применения, стратегиях технического обслуживания (ТО), хранения и транспортирования.

Информационно-измерительные системы являются объектами непрерывного длительного применения, и согласно работе [2] требования к надежности функционирования ИИС задаются следующими показателями надежности: коэффициентом готовности (K_r), средней наработкой на отказ (T_o), средним временем восстановления (T_b).

При плановом техническом обслуживании и стационарном потоке отказов λ (обратная величина наработки между отказами T_o) значения коэффициента готовности K_r и вероятности безотказной работы $P(t)$ (вероятность того, что в пределах заданной наработки T_o отказ объекта не возникнет) можно считать известными (по результатам предварительных расчетов) и неизменными в течение всего этапа эксплуатации.

Однако вследствие конструктивных особенностей современных информационно-измерительных систем и условий их эксплуатации происходит систематическое изменение значений параметра потока отказов, что ведет к необходимости проведения внеплановых мероприятий по поддержанию ИИС в работоспособном состоянии в данный момент времени. Следовательно, возникает необходимость в построении такой системы эксплуатации, которая будет способна отслеживать техническое состояние информационно-измерительной системы в режиме реального времени и выдавать необходимые рекомендации по поддержанию работоспособности информационно-измерительной системы в течение определенного временного интервала.

Для решения указанной задачи целесообразно рассматривать в качестве комплексного показателя надежности коэффициент оперативной готовности $K_{ог}$.

Основой такой системы может стать модель оценивания надежности ИИС в режиме реального времени (МОНРРВ ИИС), которая в течение всего этапа эксплуатации должна будет учитывать следующие показатели и условия:

- заложенные на этапе производства значения показателей надежности;
- выполненные мероприятия ТО;
- выполненные мероприятия восстановления;
- текущие значения показателей надежности;
- текущее техническое состояние системы.

СТРУКТУРА МОДЕЛИ ОЦЕНИВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Общий порядок построения модели оценивания надежности изделий и расчет с ее помощью показателей надежности в целом определены стандартом [3], который устанавливает общие правила по расчету надежности, требования к методикам, порядок представления результатов расчета надежности, методы расчета надежности, а также общие рекомендации по их применению для различных этапов жизненного цикла объекта.

Одним из основных методов расчета надежности является структурный метод, который базируется на построении модели оценивания надежности в следующей последовательности:

- представлении ИИС в виде структурной схемы надежности, которая будет описывать логические соотношения между состояниями элементов и системы в целом с учетом структурно-функциональных связей и взаимодействия элементов, принятой стратегии обслуживания, видов и способов резервирования и других факторов;
- описании построенной структурной схемы надежности (СШ) ИИС адекватной математической моделью, которая позволит в рамках введенных предположений и допущений вычислить $K_r(t)$ и $P(t)$ объекта по данным о надежности его элементов в рассматриваемых условиях их эксплуатации.

Предлагаемая модель оценивания надежности, в отличие от существующих, должна будет учитывать не только конструктивные особенности, схемные решения и технологию производства, но и систему технической эксплуатации ИИС: текущее техническое состояние ИИС, текущие значения показателей надежности, выполненные мероприятия технического обслуживания и восстановления [4].

На *первом этапе* построения МОНРРВ ИИС предлагается провести описание структуры модели, которая будет описывать заложенные значения показателей надежности [K_r и $P(t)$] на этапе проектирования и производства, далее следует провести описание структуры модели, которая учитывает мероприятия технического обслуживания и восстановления.

На *втором этапе* необходимо будет осуществить синтез структур, описанных на первом этапе, в единую МОНРРВ [5, 6].

В результате получим структуру МОНРРВ информационно-измерительной системы, представленную на рис. 1. В этой модели блоки осуществляют следующие задачи:

- изначально блоки 1, 8, 9 и 10 решают задачу определения заложенных значений показателей надежности [K_r и $P(t)$] на этапе проектирования и производства;
- блоки 2, 3 и 4 учитывают влияние на показатели надежности мероприятий по восстановлению ИИС;
- блоки 5, 6 и 7 учитывают влияние на показатели надежности мероприятий по техническому обслуживанию;
- блоки 3, 4, 6, 7 и 8 обеспечивают коррекцию значений параметров структурной схемы оценивания надежности ИИС после выполнения мероприятий технического обслуживания и восстановления (блоки 2 и 5) с последующим перерасчетом показателей надежности (блоки 9, 10 и 11).

Иными словами, модель оценивания надежности становится динамической, в которой техническое состояние и показатели надежности $K_r(t)$, $P(t)$ и $K_{ор}(t)$ ИИС соответствуют реальному времени.

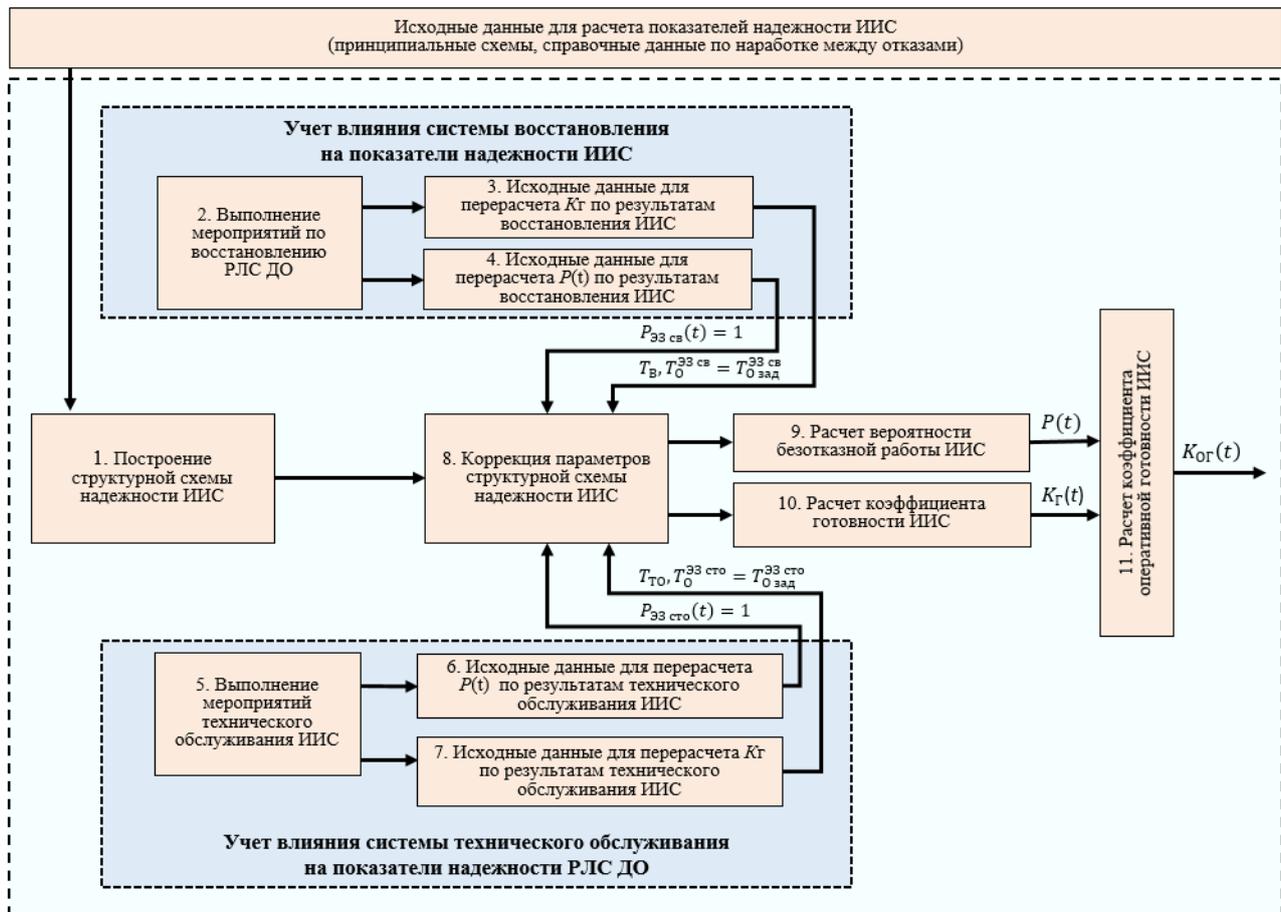


Рис. 1. Структура модели оценивания надежности ИИС в режиме реального времени

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗНАЧЕНИЙ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ КОНФИГУРАЦИЙ ИИС

Для определения заложенных значений показателей надежности [K_g и $P(t)$] на этапе проектирования и производства применяют модели и методы расчета надежности, представленные в работах [7, 8].

ИИС представляет собой сложное наукоемкое радиотехническое изделие, в котором содержатся все элементарные конфигурации (ЭК), позволяющие рассчитывать показатели надежности в следующих моделях соединения блоков:

- с последовательным соединением блоков;
- с параллельным соединением блоков с нагруженным и ненагруженным резервом;
- с параллельно-последовательным соединением блоков с нагруженным и ненагруженным резервом;
- с последовательно-параллельным соединением блоков с нагруженным и ненагруженным резервом;
- с последовательным соединением резервированных блоков с устройствами переключения;
- с резервированием m из n (идентичные элементы);
- с резервированием с дробной кратностью.

Для примера рассмотрим структурную схему надежности некоторой подсистемы А ИИС (рис. 2).

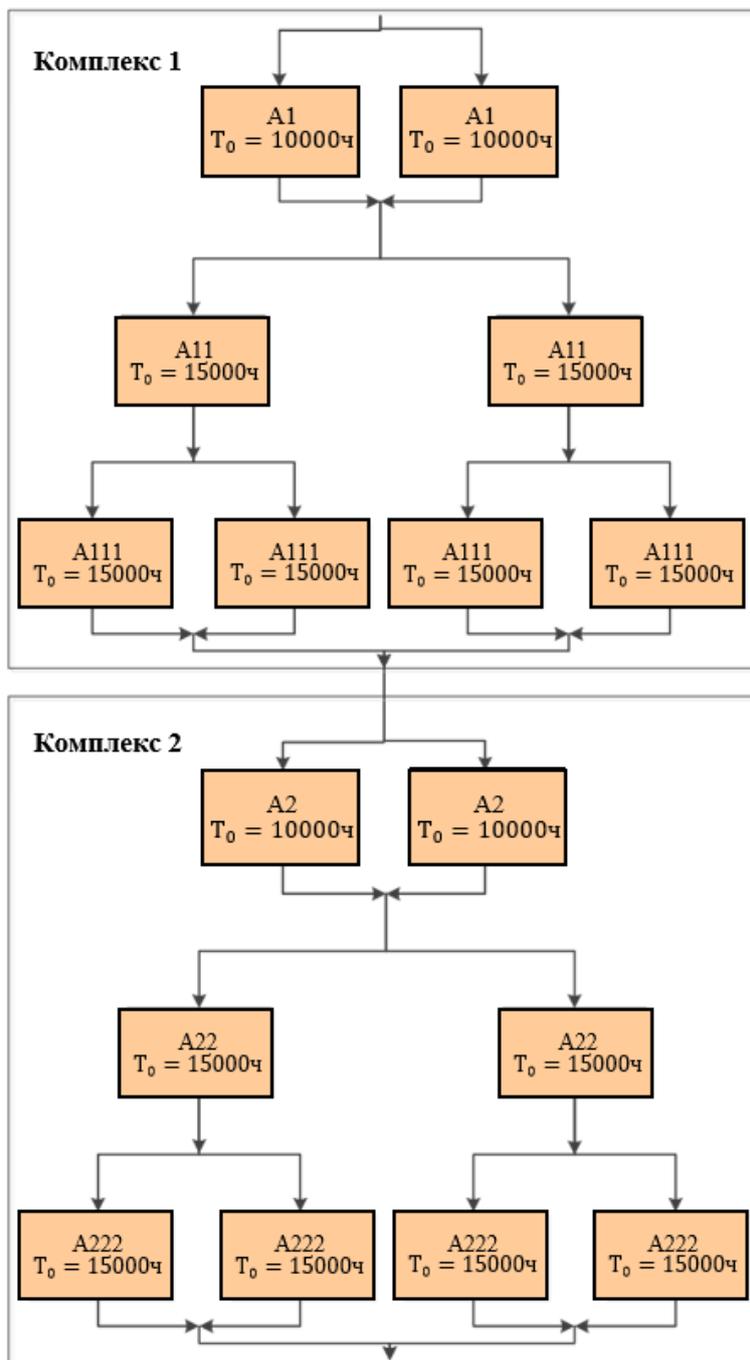


Рис. 2. Структурная схема надежности подсистемы А ИИС

Блоки 1, 8, 9 и 10 модели оценивания надежности ИИС в режиме реального времени включают в себя следующие выражения для расчетов [7–12].

Элементарная конфигурация в виде последовательного соединения блоков представлена на рис. 3.

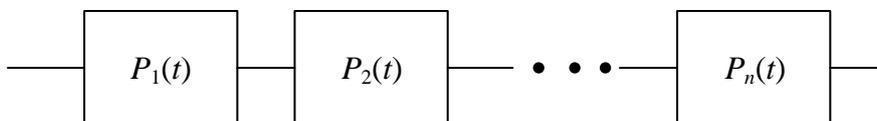


Рис. 3. Последовательная модель

Вероятность безотказной работы для модели, представленной на рис. 3, рассчитывается по следующим формулам:

$$\begin{aligned} P_1(t) &= e^{-\lambda_1 t}; P_2(t) = e^{-\lambda_2 t}; P_n(t) = e^{-\lambda_n t}; \\ P(t) &= P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot \dots \cdot P_n(t). \end{aligned} \quad (1)$$

Элементарная конфигурация в виде параллельного соединения блоков с нагруженным резервом показана на рис. 4.

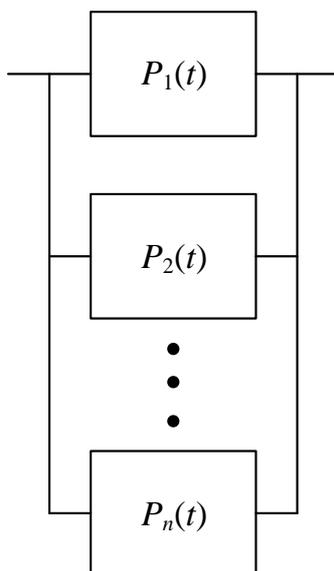


Рис. 4. Параллельная модель с нагруженным резервом

Вероятность безотказной работы для модели, представленной на рис. 4, рассчитывается по следующим формулам:

$$\begin{aligned} P_1(t) &= e^{-\lambda_1 t}; P_2(t) = e^{-\lambda_2 t}; P_n(t) = e^{-\lambda_n t}; \\ P(t) &= 1 - (1 - P_1(t)) \cdot (1 - P_2(t)) \cdot \dots \cdot (1 - P_n(t)). \end{aligned} \quad (2)$$

Элементарная конфигурация в виде параллельного соединения блоков с ненагруженным резервом изображена на рис. 5.

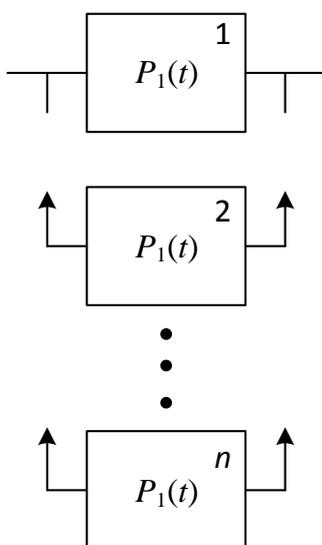


Рис. 5. Параллельная модель с ненагруженным резервом

Вероятность безотказной работы для модели, представленной на рис. 5, рассчитывается по следующим формулам:

$$P_1(t) = e^{-\lambda t};$$

$$P(t) = e^{-\lambda t} + \lambda t e^{-\lambda t} + \dots + \frac{\lambda t e^{(n-1)t} e^{-\lambda t}}{(n-1)!}. \quad (3)$$

Элементарная конфигурация в виде параллельно-последовательного соединения блоков с нагруженным резервом представлена на рис. 6.

Система состоит из резервированных последовательных цепочек элементов.

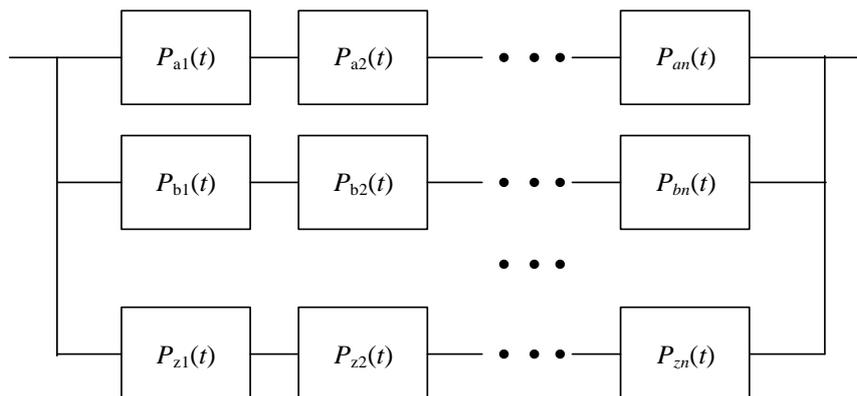


Рис. 6. Параллельно-последовательная модель с нагруженным резервом

Вероятность безотказной работы для модели, представленной на рис. 6, рассчитывается по следующим формулам:

$$P_{j1}(t) = e^{-\lambda_{j1}t}; P_{j2}(t) = e^{-\lambda_{j2}t}; P_{jn}(t) = e^{-\lambda_{jn}t};$$

$$P(t) = 1 - \prod_{j=a}^z (1 - P_{j1}(t) \cdot P_{j2}(t) \cdot \dots \cdot P_{jn}(t)). \quad (4)$$

Элементарная конфигурация в виде параллельно-последовательного соединения блоков с ненагруженным резервом показана на рис. 7.

Система состоит из резервированных последовательных цепочек элементов.

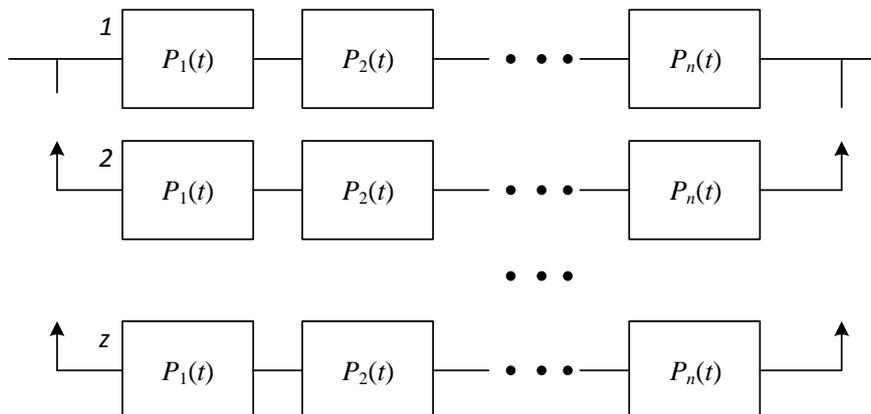


Рис. 7. Параллельно-последовательная модель с ненагруженным резервом

Вероятность безотказной работы для модели, представленной на рис. 7, рассчитывается по следующим формулам:

$$\begin{aligned}
 P_1(t) &= e^{-\lambda_1 t}; P_2(t) = e^{-\lambda_2 t}; P_n(t) = e^{-\lambda_n t}; \\
 P(t) &= e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n)t} + (\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n)t e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n)t} + \dots \\
 &+ \frac{(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n)t e^{(z-1)t} e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n)t}}{(z-1)!}.
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Элементарная конфигурация в виде последовательно-параллельного соединения блоков с нагруженным резервом показана на рис. 8.

Система состоит из последовательного соединения резервированных элементов.

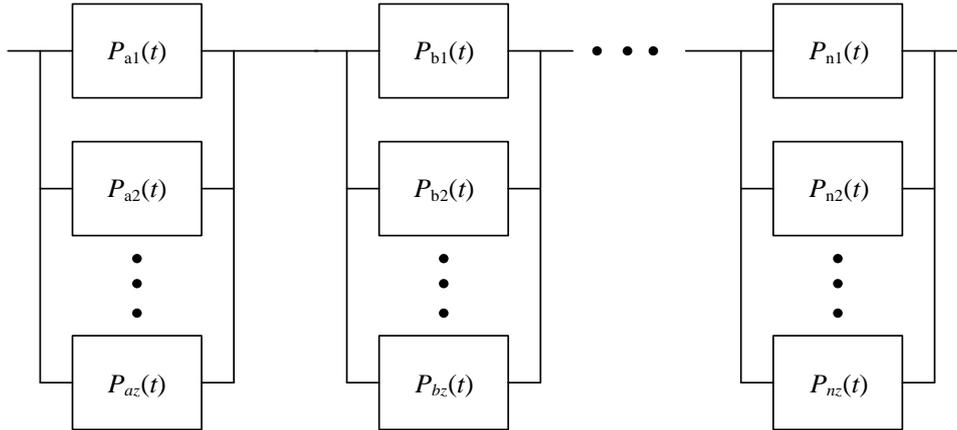


Рис. 8. Последовательно-параллельная модель с нагруженным резервом

Вероятность безотказной работы для модели, представленной на рис. 8, рассчитывается по следующим формулам:

$$\begin{aligned}
 P_{a1}(t) &= e^{-\lambda_{a1}t}; P_{a2}(t) = e^{-\lambda_{a2}t}; P_{az}(t) = e^{-\lambda_{az}t}; \\
 P_{b1}(t) &= e^{-\lambda_{b1}t}; P_{b2}(t) = e^{-\lambda_{b2}t}; P_{bz}(t) = e^{-\lambda_{bz}t}; \\
 P_{n1}(t) &= e^{-\lambda_{n1}t}; P_{n2}(t) = e^{-\lambda_{n2}t}; P_{nz}(t) = e^{-\lambda_{nz}t}; \\
 P(t) &= \{1 - (1 - P_{a1}(t)) \cdot (1 - P_{a2}(t)) \cdot \dots \cdot (1 - P_{az}(t))\} \times \\
 &\times \{1 - (1 - P_{b1}(t)) \cdot (1 - P_{b2}(t)) \cdot \dots \cdot (1 - P_{bz}(t))\} \times \dots \times \\
 &\times \{1 - (1 - P_{n1}(t)) \cdot (1 - P_{n2}(t)) \cdot \dots \cdot (1 - P_{nz}(t))\}.
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

Элементарная конфигурация в виде последовательно-параллельного соединения блоков с ненагруженным резервом представлена на рис. 9.

Система состоит из последовательного соединения резервированных элементов.

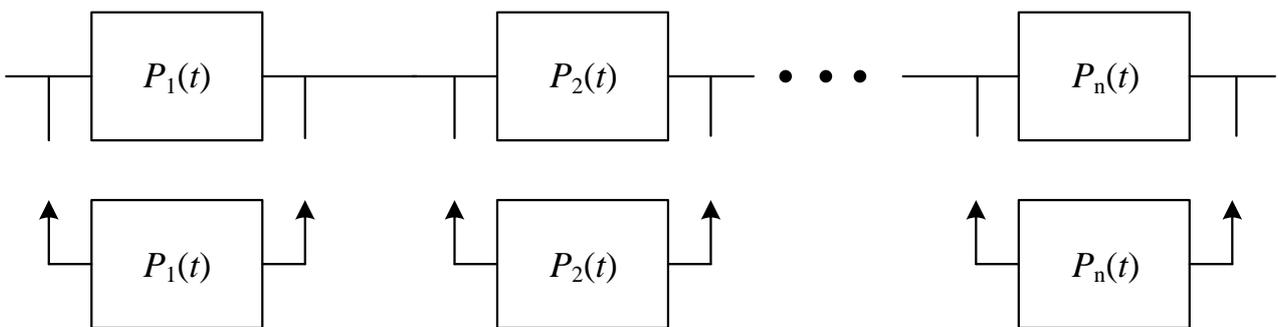


Рис. 9. Последовательно-параллельная модель с ненагруженным резервом

Вероятность безотказной работы для модели, представленной на рис. 9, рассчитывается по следующим формулам:

$$P_1(t) = e^{-\lambda_1 t}; P_2(t) = e^{-\lambda_2 t}; P_n(t) = e^{-\lambda_n t};$$

$$P(t) = (e^{-\lambda_1 t} + \lambda_1 t e^{-\lambda_1 t}) \times (e^{-\lambda_2 t} + \lambda_2 t e^{-\lambda_2 t}) \times \dots \times (e^{-\lambda_n t} + \lambda_n t e^{-\lambda_n t}). \quad (7)$$

Элементарная конфигурация в виде последовательного соединения резервированных блоков с устройствами переключения показана на рис. 10.

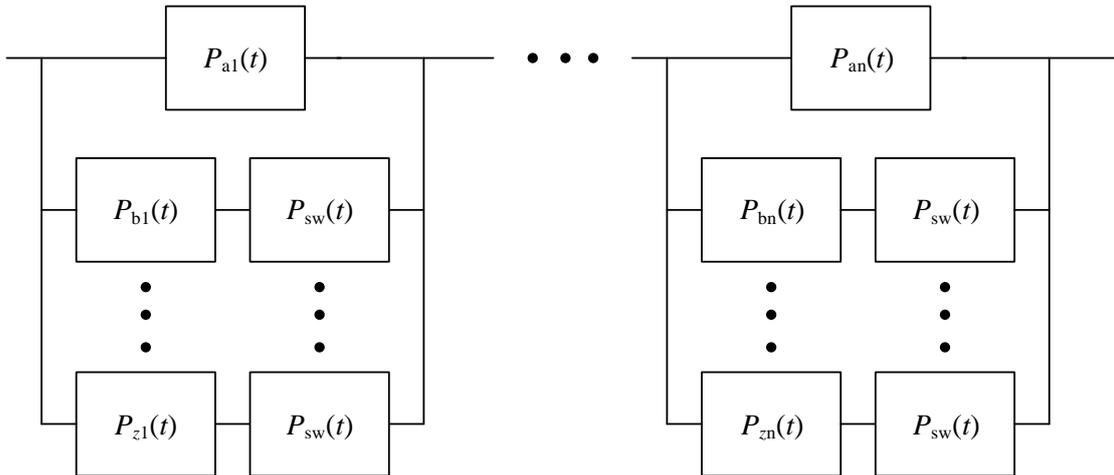


Рис. 10. Модель последовательного включения резервированных блоков с устройствами переключения

Вероятность безотказной работы для модели, представленной на рис. 10, рассчитывается по следующим формулам (все элементы имеют одинаковую вероятность безотказной работы):

$$P_{aj}(t) = P_{bj}(t) = \dots = P_{zj}(t) = P_1(t), \quad j = 1 \dots n, \quad P_{sw}(t) = 1;$$

$$P(t) = \{1 - [1 - P_1(t)] \cdot [1 - P_1(t) \cdot P_{sw}(t)]^{z-1}\}^n. \quad (8)$$

Элементарная конфигурация в виде модели m из n (идентичные элементы) показана на рис. 11.

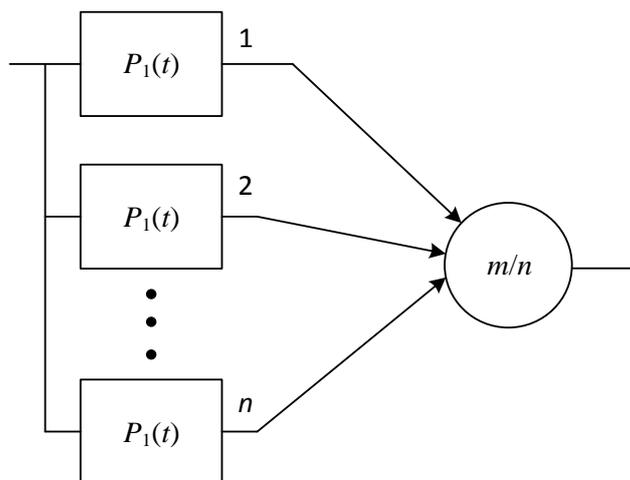


Рис. 11. Модель резервирования m из n

Если система может быть представлена параллельным соединением n идентичных элементов, а для того, чтобы она была работоспособна, необходимо, чтобы были работоспособ-

ными не менее m элементов из n , то для вероятности безотказной работы справедливы выражения:

$$P_1(t) = e^{-\lambda_1 t}; P(t) = \sum_{i=0}^{n-m} C_n^i \cdot P(t)^{n-i} \cdot [1 - P(t)]^i, C_n^i = \frac{n!}{i!(n-i)!}. \quad (9)$$

Элементарная конфигурация в виде резервирования с дробной кратностью показана на рис. 12.

При данной конфигурации нормальная работа резервированного соединения возможна только при условии, если число исправных элементов не меньше необходимого для нормальной работы m при r резервных элементах. Кратность резервирования определяется из соотношения

$$k = \frac{n-m}{m}, r = n - m. \quad (10)$$

На рис. 12 показана элементарная конфигурация в виде резервирования с дробной кратностью, состоящая из m основных и r резервных элементов.

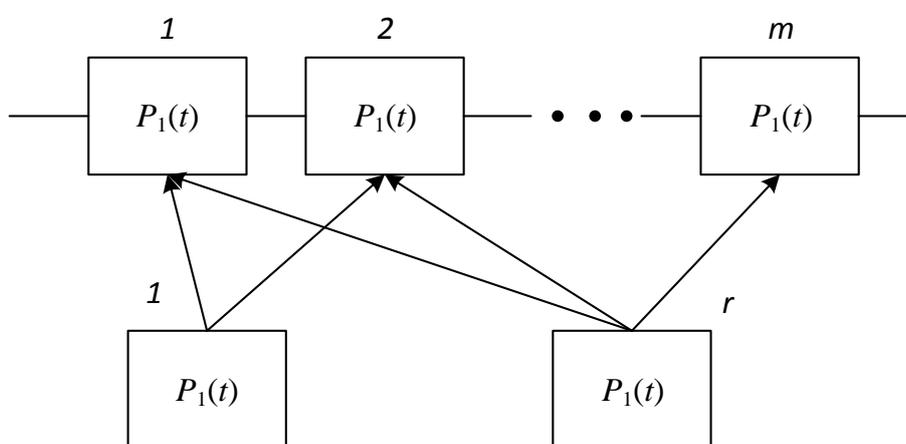


Рис. 12. Модель резервирования с дробной кратностью

Вероятность безотказной работы системы с резервированием с дробной кратностью определяется следующими выражениями:

$$P_1(t) = e^{-\lambda_1 t}; P(t) = \sum_{i=0}^k C_{m+k}^i \cdot P(t)^{m+k-i} \cdot [1 - P(t)]^i, C_{m+k}^i = \frac{(m+k)!}{i!(m+k-i)!}. \quad (11)$$

Средняя интенсивность отказов определяется по следующей формуле:

$$\lambda = -\frac{\ln(P(t))}{t}. \quad (12)$$

Средней наработке между отказами соответствует следующая формула:

$$T_0 = \frac{1}{\lambda}. \quad (13)$$

Значения коэффициентов готовности как по составным элементам ИИС, так и изделия в целом определяются по следующей формуле:

$$K_r = \frac{T_0}{T_0 + T_B}, \quad (14)$$

где среднее время между отказами T_0 задано и представлено в структурной схеме надежности подсистемы А ИИС на рис. 2, среднее время восстановления T_B указывается в техниче-

ском задании. Для проведения расчетов условно возьмем время работы подсистемы А ИИС ($t = 4320$ ч), среднее время восстановления ($T_B = 0,33$ ч).

Коэффициент оперативной готовности определяется по следующей формуле:

$$K_{ог} = K_r \cdot P(t). \quad (15)$$

РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ КОНФИГУРАЦИЙ ИИС

Для примера, расчет надежности подсистемы А ИИС представляет собой последовательность описанных ниже действий.

Для расчета основных показателей подсистемы А ИИС используется структурная схема надежности, изображенная на рис. 2. Схема представляет собой два последовательно соединенных радиоэлектронных комплекса 1 и 2. Несмотря на то, что внутренние элементы комплексов различаются, их структурные схемы и наработки между отказами элементов, составляющих ИИС, полностью идентичны. Поэтому для расчета надежности достаточно рассчитать один из комплексов, например комплекс 1, и потом соединить их последовательно в структурной схеме надежности.

В данной схеме элементы А1 в верхней части работают параллельно, причем один из них находится в нагруженном резерве. Аналогично в нижней части схемы две параллельные пары А111, в которых по одному элементу А111, также находятся в нагруженном резерве. Объединим эти три пары в элементарные конфигурации ЭК1.1, ЭК1.2 и ЭК1.3 соответственно (рис. 13).

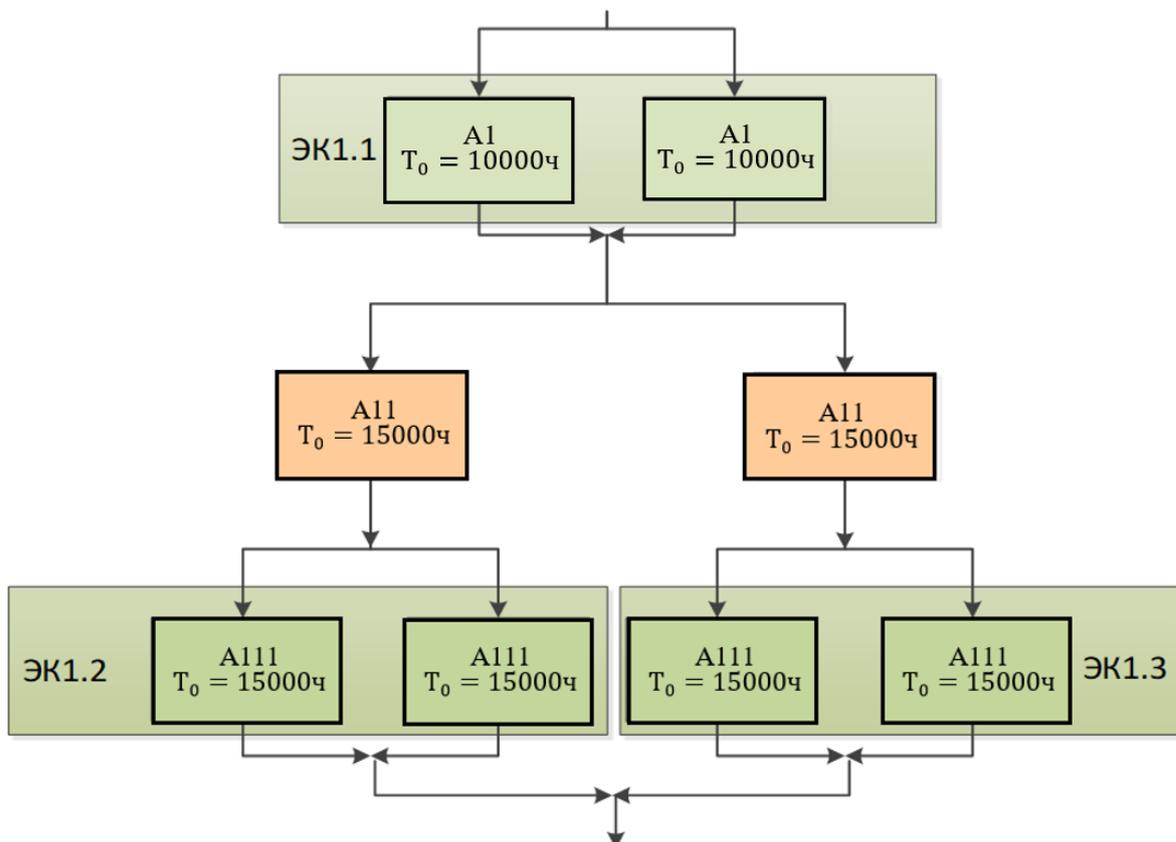


Рис. 13. Итерация 1 разбиения на ЭК схемы надежности подсистемы А ИИС

Рассчитаем основные показатели надежности ЭК1.1, ЭК1.2 и ЭК1.3 [вероятность безотказной работы $P(t)$, среднюю интенсивность отказов λ и среднюю наработку между отказами T_0 по выражениям (2), (12), (13)].

Результаты расчета для ЭК1.1:

$$P(t) = 0,876945938594377; \lambda = 0,000030395817610; T_0 = 32899,26 \text{ ч.}$$

Результаты расчета для ЭК1.2:

$$P(t) = 0,937380739281260; \lambda = 0,000014968921450; T_0 = 66805,08 \text{ ч.}$$

Результаты расчета для ЭК1.3:

$$P(t) = 0,937380739281260; \lambda = 0,000014968921450; T_0 = 66805,08 \text{ ч.}$$

Результат первой итерации разбиения на элементарные конфигурации представлен на рис. 14.

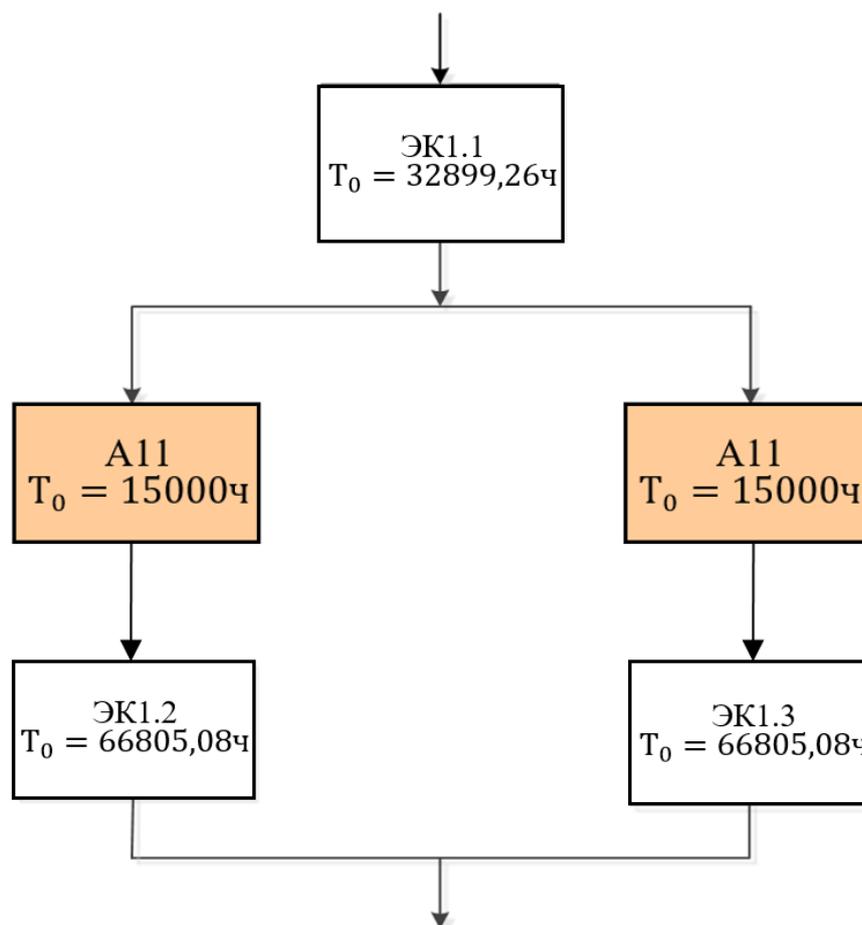


Рис. 14. Результат итерации 1 разбиения на ЭК схемы надежности подсистемы А ИИС

В данной схеме параллельно соединены две последовательные пары А11 и ЭК1.2 (ЭК1.3). Технические устройства каждой последовательной пары имеют одинаковые наработки на отказ. Причем одна последовательная пара работает постоянно, вторая – находится в нагруженном резерве. Проведем вторую итерацию разбиения на элементарные конфигурации. Ее результат представлен на рис. 15.

Рассчитаем основные показатели надежности ЭК2.1 по выражениям (1), (2), (12), (13).

Результаты расчета для ЭК2.1:

$$P(t) = 0,911679337465340; \lambda = 0,000021404387591; T_0 = 46719,39 \text{ ч.}$$

Результат второй итерации и третья итерация показаны на рис. 16.

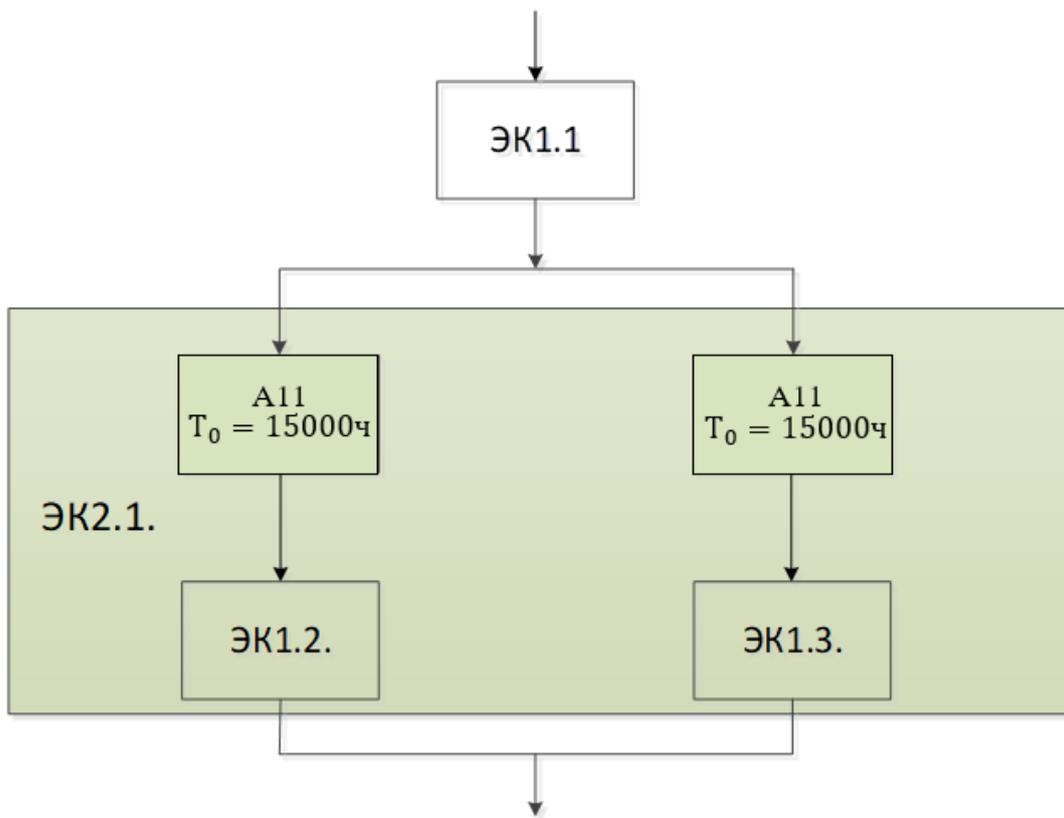


Рис. 15. Итерация 2 разбиения на ЭК схемы надежности подсистемы А ИИС

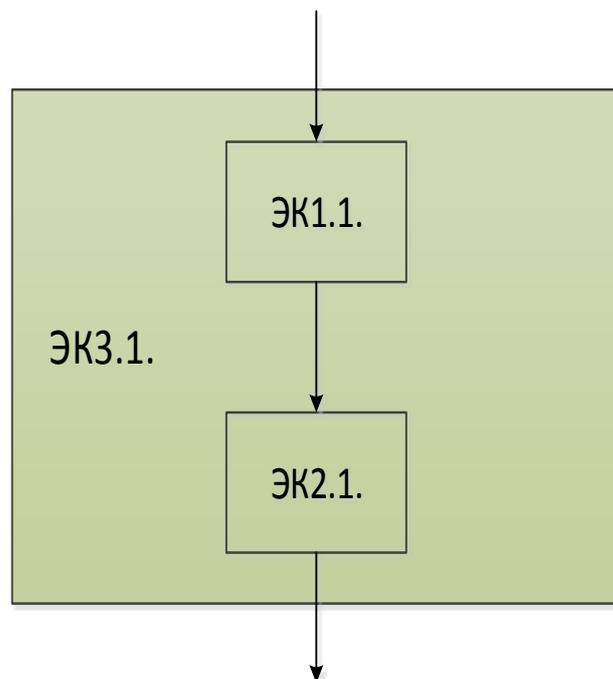


Рис. 16. Результат итерации 2 разбиения на ЭК и итерация 3 схемы надежности подсистемы А ИИС

Содержание ЭКЗ.1 соответствует структурной схеме надежности, представленной на рис. 3.

Результаты расчета для ЭКЗ.1 по выражениям (1), (12), (13) – в нашем случае это комплекс 1:

$$P(t) = 0,799493477410234; \lambda = 0,000051800209509; T_0 = 19304,94 \text{ ч.}$$

Учитывая, что комплекс 1 и комплекс 2 имеют одинаковые надежные характеристики, результат третьей итерации будет иметь вид, показанный на рис. 17.

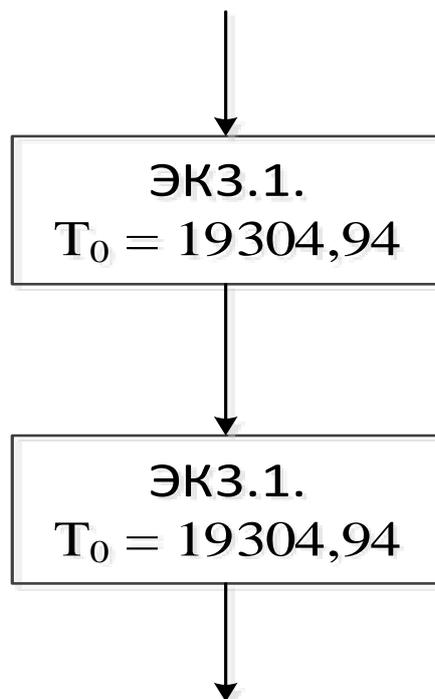


Рис. 17. Результат итерации 3 и итоговая структурная схема надежности подсистемы А ИИС

Результаты расчета структурной схемы подсистемы А ИИС по выражениям (1), (12)–(15):
 $P(t) = 0,639189802271063; \lambda = 0,000103600425591; T_0 = 9652,46 \text{ ч, } K_r = 0,9999; K_{ор} = 0,6391.$

Таким образом, основой блоков 1, 8, 9, 10 и 11 являются структурные схемы надежности составных элементов ИИС и системы в целом, а самое главное – логика их разбиения на элементарные конфигурации, например, для подсистемы А ИИС это последовательность рисунков – рис. 2, 13–17 и расчет с использованием соответствующих выражений из перечня (1)–(15). Очевидно, что для каждой ИИС необходимо создавать свою подобную модель, поскольку между ними есть существенные различия как в схемных решениях и логике разбиения на ЭК, так и в используемой элементной базе. Для ее применения в эксплуатационных задачах реализацию модели необходимо выполнить в виде программного продукта, как часть программного обеспечения вычислительного комплекса ИИС.

УЧЕТ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ВОССТАНОВЛЕНИЮ ИИС ПРИ РАСЧЕТЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ

Учет мероприятий по восстановлению ИИС при расчете показателей надежности осуществляется в блоках 2, 3, 4, 8, 9, 10 и 11 модели оценивания надежности в режиме реального времени. В данной модели сам процесс восстановления не моделируется и не описывается. Необходимо знать результат этого процесса, а именно обнаруженные неработоспособные

составные элементы системы, которые были заменены на новые или восстановлены до работоспособного состояния.

В первом случае для таких элементов наработка между отказами $T_0^{\text{ЭЗ СВ}} = T_{0\text{зад}}^{\text{ЭЗ СВ}}$, а вероятность безотказной работы $P_{\text{ЭЗ СВ}}(t) = 1$.

Во втором случае их значения останутся текущими. Расчет текущих значений показателей надежности осуществляется аналогичным образом, как описано выше, но с новыми исходными данными. Для этого в МОНРРВ используются структурные схемы надежности из блока 1, настройка значений параметров данной схемы осуществляется в блоке 8 по исходным данным из блоков 3 и 4 после выполнения мероприятий по восстановлению ИИС (блок 2). Расчет осуществляется в блоках 9, 10 и 11 с учетом установленной логики разбиения структурной схемы надежности на элементарные конфигурации и применения выражений (1)–(15). Например, для рассматриваемой подсистемы А ИИС, представленной на рис. 2, это осуществляется следующим образом.

Пусть основной элемент А2 комплекса 2 отказал через 500 ч, его восстановили до работоспособного состояния через 1000 ч, снова отказал через 1000 ч, его восстановили до работоспособного состояния через 1000 ч, снова отказал через 500 ч, его восстановили до работоспособного состояния через 1000 ч. Пусть резервные элементы А111 и А222 отказали через 5000 ч и были заменены на новые.

В указанном случае текущее техническое состояние модели, представленное в блоке 8 (см. рис. 1), используется в качестве исходных данных для расчета текущих значений показателей надежности в блоках 9, 10 и 11 модели и будет иметь вид, показанный на рис. 18.

Данное текущее техническое состояние характеризуется измененными значениями наработки между отказами. Так, для основного элемента А2 комплекса 2 оно составит 8000 ч, поскольку этот элемент проработал всего 2 ч, остальное время он находился в ремонте. Для резервных элементов А111 и А222 оно составит 15000 ч, поскольку данные элементы были заменены на новые. Нарботка между отказами остальных элементов уменьшилась на 5000 ч: именно столько проработала подсистема А ИИС в реальном времени.

Зная текущее техническое состояние составных частей (блок 8), можно осуществить циклический перерасчет текущих значений показателей надежности ИИС с использованием структурных схем надежности (блок 1) и логики их разбиения на элементарные конфигурации с применением выражений (1)–(15) в блоках 9, 10 и 11. Циклический перерасчет необходимо производить после каждого мероприятия по восстановлению ИИС. Именно такой подход позволит существенно приблизить расчетное техническое состояние ИИС к реальному в текущий момент времени.

Знание, какие элементы замены являются новыми, а какие – восстановленные и уже отказывали, значительно влияет на решения по повышению коэффициента оперативной готовности и по объему технического обслуживания ИИС.

Допустим, необходимо провести мероприятия по повышению коэффициента оперативной готовности для выполнения очень важной задачи на следующий интервал времени после 5000 ч применения ИИС. Для этого необходимо собрать высоконадежную конфигурацию основных элементов подсистемы А ИИС. Очевидно, что с этой целью необходимо поменять местами резервные и основные элементы А2 комплекса 2, А111 и А222. Данное решение минимизирует риски отказов основных элементов ИИС и тем самым минимизирует риски применения элементов ИИС, отвечающих за реконфигурацию при возникновении отказов, поскольку данные элементы тоже имеют свою надежность.

Так, на первый взгляд, может показаться странным замена местами резервных и основных элементов А2 комплекса 2, поскольку наработка между отказами у основного А2 комплекса 2 (8000) больше, чем у резервного (5000). Однако здесь следует учесть наличие у основного элемента трех отказов за предыдущий период эксплуатации.

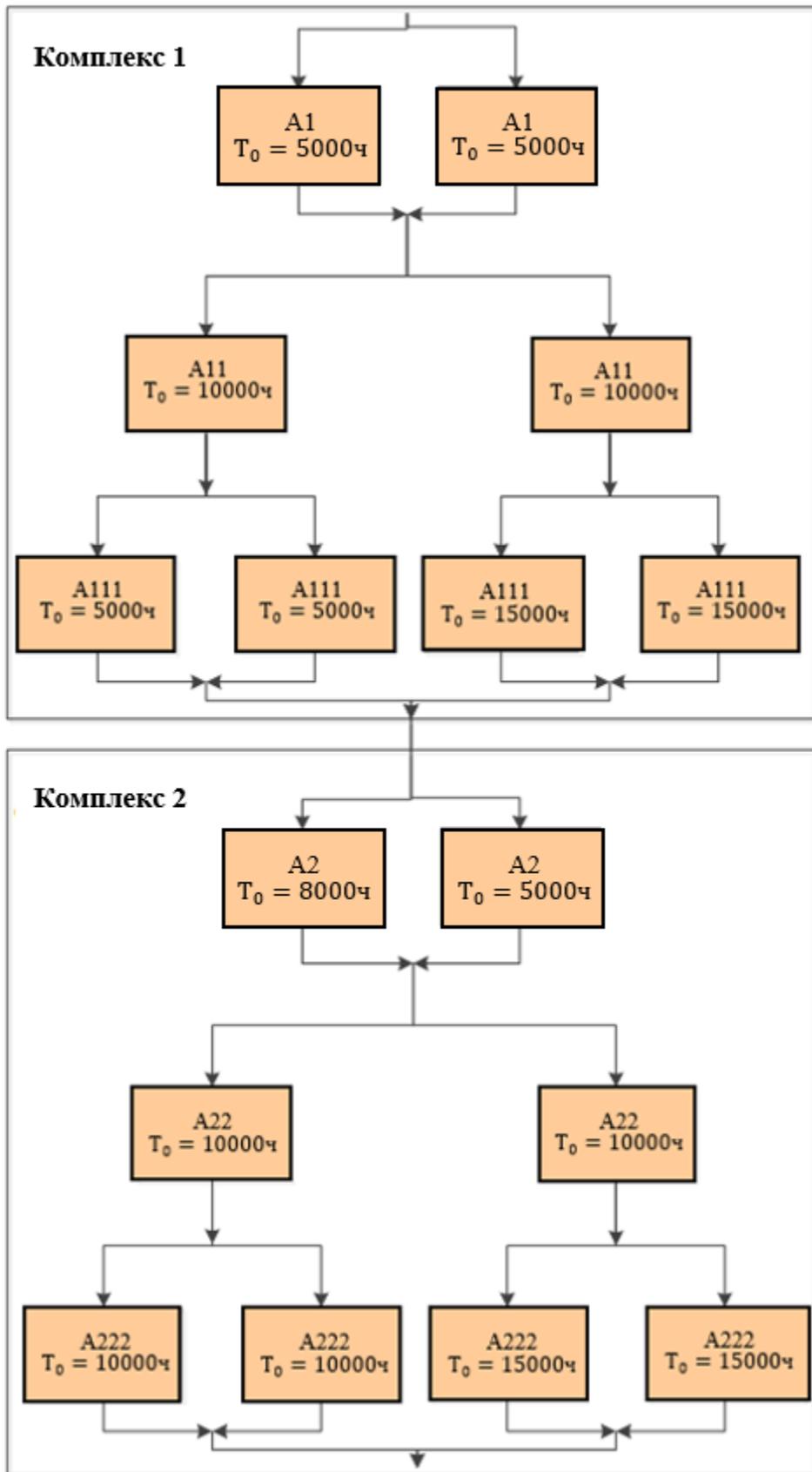


Рис. 18. Текущее техническое состояние подсистемы А ИИС после мероприятий по восстановлению

Если после выполнения боевой задачи планируется оставить элементы замены в конечном варианте, то необходимо в МОНРРВ уточнить текущее техническое состояние ИИС и запустить цикл перерасчета текущих показателей надежности системы.

УЧЕТ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ ОБСЛУЖИВАНИЮ ИИС ПРИ РАСЧЕТЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ

Учет мероприятий по техническому обслуживанию ИИС при расчете показателей надежности осуществляется в блоках 5, 6, 7, 8, 9, 10 и 11 модели оценивания надежности в режиме реального времени. В данной модели сам процесс технического обслуживания не моделируется и не описывается. Но его основа заключается в заблаговременной замене ненадежных элементов на новые.

В указанном случае данный учет похож на учет мероприятий по восстановлению, за исключением восстановления работоспособности элементов замены. Такая операция при техническом обслуживании не проводится.

В целом необходимо знать результат указанного процесса, а именно составные элементы информационно-измерительной системы, которые были заменены на новые. В рассматриваемом случае для таких элементов наработка между отказами составит $T_0^{\text{ЭЗ сто}} = T_0^{\text{ЭЗ зад}}$, а вероятность безотказной работы – $P_{\text{ЭЗ сто}}(t) = 1$.

Расчет текущих значений показателей надежности осуществляется аналогичным образом, как описано выше, но с новыми исходными данными.

Для этого в МОНРРВ используются структурные схемы надежности из блока 1, настройка значений параметров данной схемы осуществляется в блоке 8 по исходным данным из блоков 6 и 7 после выполнения мероприятий по техническому обслуживанию ИИС (блок 5). Расчет осуществляется в блоках 9, 10 и 11 с учетом установленной логики разбиения структурной схемы надежности на элементарные конфигурации и применения выражений (1)–(15). Например, для подсистемы А ИИС это осуществляется следующим образом.

Допустим, объем технического обслуживания на момент 5000 ч эксплуатации предусматривает замену на новые всех основных элементов А1, А2 и всех резервных элементов А111 и А222.

В указанном случае текущее техническое состояние, которое находится в блоке 8 модели, и используется в качестве исходных данных для расчета текущих значений показателей надежности в блоках 9, 10 и 11 модели, и будет иметь вид, показанный на рис. 19.

Данное текущее техническое состояние характеризуется измененными значениями наработки между отказами. Так, для основных элементов А1 и А2 оно составит 10000 ч, для резервных элементов А111 и А222 – 15000 ч, поскольку данные элементы были заменены на новые. Нарботка между отказами остальных элементов уменьшилась на 5000 ч: именно столько проработала подсистема А информационно-измерительной системы в реальном времени.

На основании текущего технического состояния составных частей (блок 8) осуществляется циклический перерасчет текущих значений показателей надежности ИИС с использованием структурных схем надежности (блок 1) и логики их разбиения на элементарные конфигурации с применением выражений (1)–(15) в блоках 9, 10 и 11. Циклический перерасчет необходимо производить после каждого мероприятия по техническому обслуживанию ИИС [13, 14].

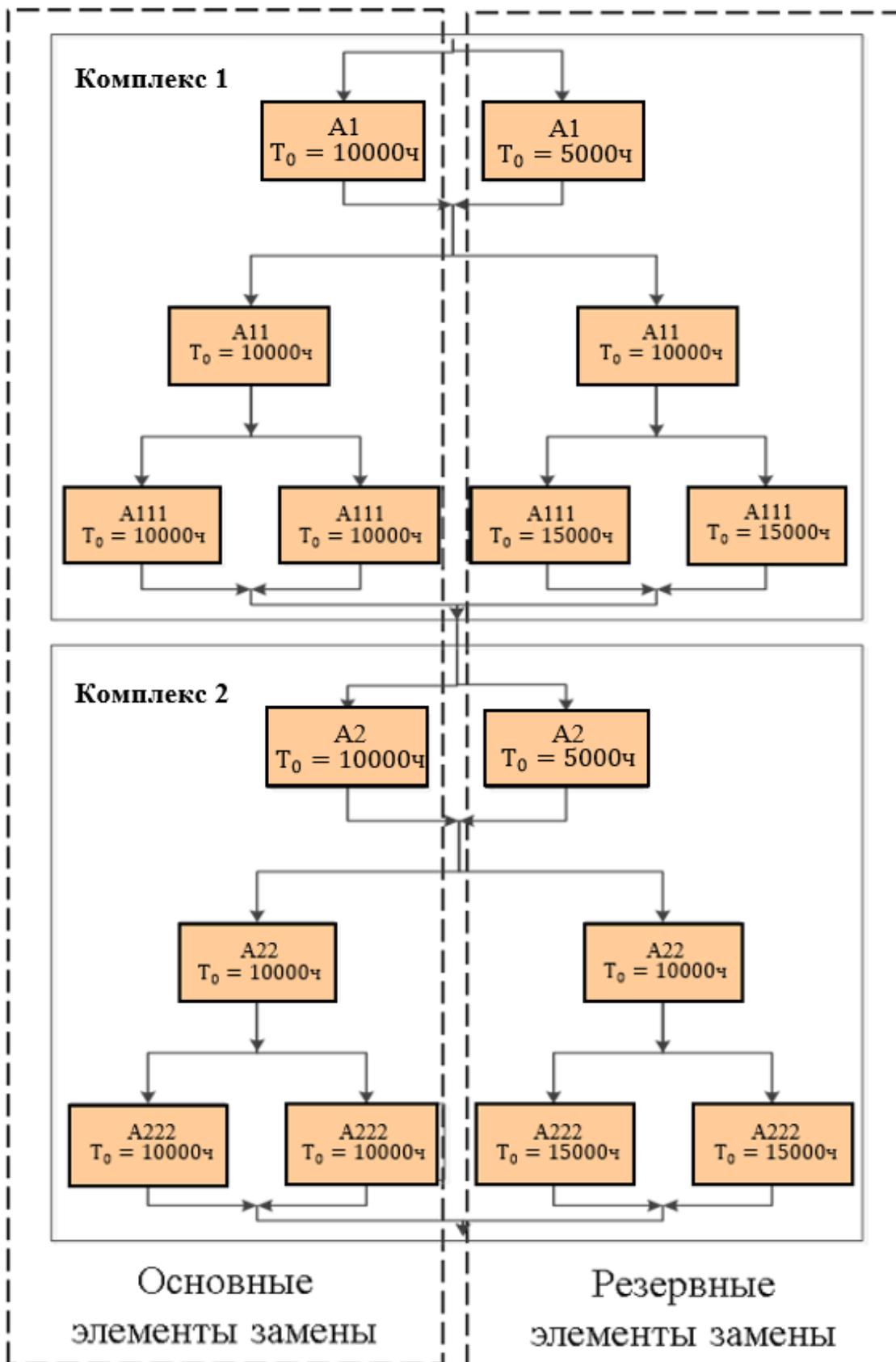


Рис. 19. Текущее техническое состояние подсистемы А ИИС после мероприятий по техническому обслуживанию

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная модель оценивания надежности ИИС в режиме реального времени, в отличие от известных, является динамической и учитывает проводимые мероприятия технической эксплуатации (технического обслуживания и восстановления).

Такая модель наиболее приближена к реальному техническому состоянию ИИС и позволяет:

- осуществлять расчет коэффициента оперативной готовности по данным вероятности безотказной работы и коэффициента готовности с учетом изменений в режимах работы и техническом состоянии элементов ИИС;
- учитывать установленную логику разбиения структурной схемы надежности ИИС на элементарные конфигурации (схемы соединения элементов и их резервирования);
- повысить обоснованность решений по коррекции сроков и объемов проведения технического обслуживания и восстановления в соответствии с результатами оценки технического состояния ИИС в данный момент времени эксплуатации.

Список используемых источников

1. ГОСТ Р 27.102–2021. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения. – М. : Российский институт стандартизации, 2021. – 35 с.
2. ГОСТ 27.003–2016. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности. – М. : Стандартинформ, 2018. – 18 с.
3. ГОСТ 27.301–95. Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения. – Минск : Межгосударственный Совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1995. – 13 с.
4. Барзилович Е. Ю. Модели технического обслуживания сложных систем : учеб. пособие. – М. : Высш. шк., 1982. – 231 с.
5. Лисицкий В. В., Вяльдин Д. М., Завадский Г. В. Особенности моделирования сложных радиотехнических систем // Актуальные научно-технические аспекты разработки, испытаний и эксплуатации средств ракетно-космической обороны : сб. науч. тр. ВНТК. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2022. – С. 89–93.
6. Вяльдин Д. М., Столбов А. В., Мартынов А. М. Алгоритм выработки рациональных вариантов восстановления информационно-измерительных систем при возникновении нештатных ситуаций // Актуальные научно-технические аспекты разработки, испытаний и эксплуатации средств ракетно-космической обороны : сб. науч. тр. ВНТК. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2022. – С. 102–108.
7. ГОСТ Р 27.010–2019 (МЭК 61703:2016). Надежность в технике. Математические выражения для показателей безотказности, готовности, ремонтпригодности. – М. : Стандартинформ, 2019. – 80 с.
8. ГОСТ Р МЭК 61078–2021. Надежность в технике. Структурная схема надежности. – М. : Рос. ин-т стандартизации, 2023. – 89 с.
9. Козлов Б. А., Ушаков И. А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. – М. : Сов. радио, 1975. – 472 с.
10. Надежность и эффективность в технике : справочник : в 10 т. – Т. 2 / под ред. Б. В. Гнеденко. – М. : Машиностроение, 1987. – 280 с.; т. 5 / под ред. В. И. Патрушева и А. И. Рембезы. – М. : Машиностроение, 1988. – 224 с.
11. Надежность технических систем : справочник / под ред. И. А. Ушакова. – М. : Радио и связь, 1985. – 608 с.

12. *Половко А. М., Гуров С. В.* Основы теории надежности. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб. : БВХ-Петербург, 2006. – 704 с.
13. *Бережнов В. И.* Оценка надежности автоматических систем с периодическим контролем технического состояния и восстановлением. Автоматика и вычислительная техника. – Рига : Знание, 1965. – 168 с.
14. Надежность и эксплуатация радиотехнических систем : моногр. / С. Ф. Боев [и др.]; под ред. С. Ф. Боева. – М. : Научная книга, 2018. – 370 с.

В. С. Забузов,
кандидат технических наук;
И. В. Захаров,
доктор технических наук, доцент;
А. Мусаллам

УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ СПОСОБ ОПТИМИЗАЦИИ КОЛИЧЕСТВА КОНТРОЛЬНЫХ ТОЧЕК ПРИ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОЙ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКЕ ИНФОРМАЦИИ

Решение задач применения бортовых вычислительных систем (БВС) в условиях деструктивного влияния неблагоприятных факторов различного происхождения требует рациональной организации вычислительного процесса. Рассмотрен параллельный вычислительный процесс с временной избыточностью в отказоустойчивой БВС при внешних воздействиях, включающий периодическое сохранение текущего состояния вычислений с возможностью их восстановления. Усовершенствовано ранее известное решение частной оптимизационной задачи выбора периодичности сохранения текущего состояния вычислительного процесса в условиях возможных отказов. Представлены результаты имитационного моделирования, и приведен их краткий анализ.

Ключевые слова: бортовая вычислительная система, деградация, параллельные вычисления, прогнозирование.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальным направлением современного развития аэрокосмических технологий является создание автономных малоразмерных летательных аппаратов (космических аппаратов, беспилотных летательных аппаратов), управляемых интеллектуализированными бортовыми комплексами управления на базе бортовых вычислительных систем (БВС), которые функционируют в режимах реального времени. К таким БВС, несмотря на их малые габариты, предъявляются жесткие требования по надежности и производительности. В то же время решение целевых задач в условиях возмущающих факторов тесно связано с отказоустойчивостью БВС. Важным аспектом реализации данного направления является диспетчеризация вычислительного процесса на основе учета условий функционирования [1].

Широко известен подход, позволяющий реализовать параллельную обработку информации в условиях возможных отказов части вычислительных модулей (ВМ) системы на основе периодического запоминания на централизованном запоминающем устройстве состояния вычислительного процесса [2]. Прерванное вследствие отказа ВМ решение задачи возобновляется на работоспособном ВМ. Оставшийся объем вычислений определяется моментом последнего сохраненного состояния вычислительного процесса – «контрольной точки» (КТ). Это позволит не проделывать вновь ранее выполненную вычислительную работу от начала программы. Вместе с тем целесообразно оптимизировать количество КТ, так как, с одной стороны, увеличение их числа позволяет затрачивать меньше времени на завершение вычислений прерванной отказом ВМ задачи, а с другой – создание каждой «контрольной точки» вносит временную избыточность в вычислительный процесс.

Очевидно, что решение указанного вопроса находится в прямой зависимости от оценки условий функционирования БВС, а именно от опасности отказов ВМ. В некоторых работах [3, 4] предложено соответствующее решение задачи оптимизации количества КТ и представлены оценки ожидаемого эффекта. На наш взгляд, указанный способ полезно усовершенствовать.

ЗАДАЧА ОПТИМИЗАЦИИ КОЛИЧЕСТВА КОНТРОЛЬНЫХ ТОЧЕК ПРИ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОЙ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКЕ ИНФОРМАЦИИ

Будем считать, что однородная вычислительная система состоит из некоторого числа ВМ, каждый из которых решает в один момент времени одну задачу в соответствии с расписанием вычислительного процесса. Система должна выполнить определенный набор взаимонезависимых задач, которые для определенности будем полагать равными по трудоемкости.

Процессы решения задач могут быть прерваны отказами ВМ, которые вследствие воздействия некоторого фактора происходят в один и тот же, но заранее неизвестный случайный момент времени. Для обеспечения отказоустойчивости функционирования системы реализован механизм КТ, кроме того, ВМ системы обладают запасом производительности по отношению к решаемым задачам, а сама система – структурным резервом в виде некоторого избыточного количества ВМ. В результате образуется временная избыточность вычислительного процесса, за счет наличия которой возможно обеспечить выполнение заданного набора задач при отказах ВМ.

Общее время выполнения всех задач будет зависеть не только от времени отказов ВМ, но и от количества создаваемых при решении каждой задачи КТ и временных затрат на эти действия. Очевидно, что увеличение количества КТ уменьшает, с одной стороны, остаточный объем вычислений при отказах, с другой – и само требует временных затрат. Отсюда возникает задача поиска оптимального количества КТ для заданных параметров вычислительной системы, вычислительных задач и риска отказов ВМ.

Авторы работ [3, 4] в целом справедливо указали, что период решения задачи состоит из k интервалов, каждый из которых, кроме последнего, включает интервал τ выполнения задачи и интервал Δ создания КТ. Если отказ одного ВМ происходит в момент времени ξ , то общее время решения задачи составит

$$\theta = \xi + T - (i - 1)\tau = \xi + T \left(1 - \frac{1}{k} \left\lfloor \frac{k\xi}{T+k\Delta} \right\rfloor\right), \quad (1)$$

где T – время, необходимое для решения задачи без учета отказов, $T = k\tau$;
 i – номер интервала, на котором произошел отказ ВМ, $i = \lfloor \xi/(\tau + \Delta) \rfloor + 1$;
 $\lfloor \cdot \rfloor$ – ближайшее целое, меньшее или равное.

Если известна плотность распределения $f(\xi)$ момента времени отказа ВМ, то математическое ожидание $\bar{\theta}$ времени выполнения задачи составит $\bar{\theta} = \int_0^T f(\xi)\theta(k, \xi)d\xi$.

Для оценки $\bar{\theta}$ и дальнейшего решения оптимизационной задачи $\bar{\theta}(k) \rightarrow \min$ авторы работ [3, 4] использовали следующий подход. Согласно [3], среднее значение общего времени θ , затрачиваемого на решение задачи, определяется как

$$\bar{\theta} = (1 - q^2)\bar{\theta}_0 + 2q(1 - q)\bar{\theta}_1, \quad (2)$$

где $\bar{\theta}_1$ – среднее время выполнения задачи при отказе одного из двух ВМ;
 $\bar{\theta}_0$ – время выполнения задачи при безотказной работе БВС;
 q – вероятность отказа ВМ.

По-видимому, здесь авторы рассмотрели пару ВМ из состава БВС, не учитывая в оценке $\bar{\theta}$ случай отказа обоих ВМ в предположении, что общее число ВМ достаточно велико и задача будет переназначена на исправный ВМ. Отметим при этом, что, на наш взгляд, полученная таким путем оценка $\bar{\theta}$ может оказываться излишне оптимистичной, так как не учитывает полную группу событий. Далее, оценка $\bar{\theta}_0$ трудностей не вызывает, а $\bar{\theta}_1$ авторам удалось рассчитать для равномерного закона распределения момента отказа как [3, 4]

$$\bar{\theta}_1 = \frac{1}{2} \left(3T + (k - 1)\Delta - \frac{T(T+k\Delta)(k-1)}{k(T+(k-1)\Delta)} \right). \quad (3)$$

Из выражений (2) и (3), дифференцируя полученную сумму по k , оптимальное количество КТ определяется путем численного решения относительно k уравнения четвертой степени $\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial k} = 0$:

$$\Delta k^2(k^2\Delta^2 + 2k\Delta T - 2k\Delta^2 - 2\Delta T + \Delta^2 + T^2) - qT^2(2k\Delta - \Delta + T) = 0, \quad (4)$$

округляя значение искомого корня уравнения до натурального числа (количество КТ на одну меньше количества интервалов k) [3].

Отметим, что анализ результатов решения (4) при $\Delta \rightarrow 0$ затруднен, по-видимому, вследствие присутствия в явном виде Δ и T .

МОДИФИЦИРОВАННАЯ ОЦЕНКА СРЕДНИХ ПОТЕРЬ ВРЕМЕНИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПРИ ОТКАЗАХ

На наш взгляд, вместо соотношения (2) и вытекающих из него результатов корректнее использовать следующие соображения. Среднее время вычислений, потерянное в результате отказа ВМ, составит $\tau/2$, а его ожидаемая величина с учетом риска отказа – $q\tau/2$. Время, затраченное на создание КТ, равно $(k - 1)\Delta$. Таким образом, в качестве оценки математического ожидания избыточного времени решения задачи будет выступать величина

$$\bar{\beta} = \frac{q\tau}{2} + (k - 1)\Delta = \frac{qT}{2k} + (k - 1)\Delta. \quad (5)$$

Приравнивая к нулю производную по k выражения (5), получим

$$-\frac{qT}{2k^2} + \Delta = 0, \quad k = \sqrt{\frac{qT}{2\Delta}} = \sqrt{\frac{q}{2\delta}}, \quad (6)$$

где δ – доля временных затрат на создание одной КТ относительно времени непосредственного решения задачи, при этом $\delta = \Delta/T$. Округление будем производить в большую сторону, исходя из соображения, что $k > 0$.

По нашему мнению, предложенный способ имеет преимущество за счет более корректной оценки общего случая, а также значительного упрощения анализа и прикладных расчетов. Так, анализ формулы (6) показывает соответствие ожидаемым теоретическим представлениям и здравому смыслу: количество КТ растет с увеличением опасности отказов и уменьшением временных затрат на их создание; создание КТ не имеет смысла при нулевой вероятности отказа и при времени создания одной КТ, которое составит более половины времени непосредственного решения задачи; размерность (масштаб) единиц времени не играет роли.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Проведем сравнительный анализ исходного и усовершенствованного способов нахождения оптимального числа КТ при помощи имитационного моделирования.

Пример рассчитанного различными способами количества интервалов k сохранения вычислений представлен в табл. 1 в виде А/Б, где А соответствует исходному способу согласно выражению (4), Б – модифицированному согласно выражению (6).

Таблица 1

Предлагаемое количество «контрольных точек» (интервалов)
сохранения вычислений

δ	0,01	0,02	0,05	0,1
$q = 0,1$	14 / 3	8 / 2	3 / 2	2 / 1
$q = 0,25$	26 / 4	15 / 3	6 / 2	3 / 2
$q = 0,5$	37 / 6	23 / 4	9 / 3	5 / 2
$q = 0,75$	46 / 7	30 / 5	12 / 3	6 / 2

В случае использования как формулы (4), так и формулы (6) k не зависит от количества ВМ и количества задач, что следует из принятых допущений. Однако при получении оценок достигаемого эффекта указанные величины требуются для расчетов на имитационной модели. Для определенности целесообразно принимать количество ВМ M равным числу задач N , а затем исследовать случай, при котором $M > N$ (случай $M < N$ не соответствует поставленной задаче, так как требует увеличения рассматриваемого интервала T).

Будем разыгрывать случайное время $\xi \in [0; T]$ возможных с вероятностью q отказов ВМ. Задачи с отказавших ВМ переназначаются на исправные по порядку очередности в силу допущения об их однородности. Результат оценки выигрыша σ по средней производительности на интервале решения набора задач (а не по среднему времени вычислительного процесса, так как в случаях отказов всех ВМ время решения устремляется в бесконечность) относительно реализации вычислительного процесса без КТ приведен в табл. 2 в виде А/Б/В, где аналогично А соответствует исходному способу, Б – модифицированному, В – случаю необесценивающего отказа (для наглядного сравнения как идеальный вариант с $\delta = 0$, $k \rightarrow \infty$).

Таблица 2

**Оценка среднего относительного выигрыша в производительности,
 $M = N = 8$**

δ	0,01	0,02	0,05	0,1
$q = 0,1$	1,01 / 1,07 / 1,17	0,99 / 1,04 / 1,18	1,00 / 1,02 / 1,21	0,98 / 1,00 / 1,27
$q = 0,25$	1,06 / 1,20 / 1,35	1,03 / 1,16 / 1,36	1,02 / 1,09 / 1,40	1,01 / 1,04 / 1,47
$q = 0,5$	1,15 / 1,38 / 1,60	1,08 / 1,30 / 1,61	1,07 / 1,21 / 1,65	1,04 / 1,12 / 1,73
$q = 0,75$	1,28 / 1,56 / 1,91	1,17 / 1,48 / 1,92	1,15 / 1,32 / 1,99	1,12 / 1,19 / 2,08

Строго говоря, для случая необесценивающего отказа соответствующие величины в строках табл. 2 не должны отличаться в силу их декларированной независимости от значения δ , однако представленные оценки учитывают сохранение результата вычислений после окончания решения задачи относительной длительностью δ для корректности сравнения с вариантами А и Б. Заметим также, что из выражения (6) вытекает грубая оценка нижней границы целесообразности $\delta < q/2$, что вполне соотносится с данными в табл. 2.

График с примером зависимости ожидаемого относительного выигрыша в производительности $\sigma(\delta, q)$ при $M = N = 8$ для усовершенствованного способа оптимизации количества КТ представлен на рис. 1.

На рис. 2 изображены графики зависимости σ от количества ВМ M при $M = N$, а также в случае наличия ВМ в холодном резерве (для определенности двукратного $M = 2N$ и пятикратного $M = 5N$) при $\delta = 0,02$.

Данные примеры показывают возможность существенного снижения потерь производительности для указанных условий и допущений. Разница в характере поведения графиков для рассмотренных случаев на рис. 2, а и б объясняется целесообразностью увеличения резерва ВМ с увеличением опасности отказов, в то время как наличие значительного резерва при низком риске отказов снижает выигрыш от применения механизма КТ.

Далее, отметим явную тенденцию выхода графиков на «насыщение» с ростом количества ВМ в случаях определенного соотношения параметров (например, как видно из рис. 2, а, вариант параметров $q = 0,25$; $\delta = 0,02$ не является существенно выигрышным для $M = 5N$ – пятикратный аппаратный резерв значительно парирует отказы и снижает актуальность сохранения вычислений посредством КТ).

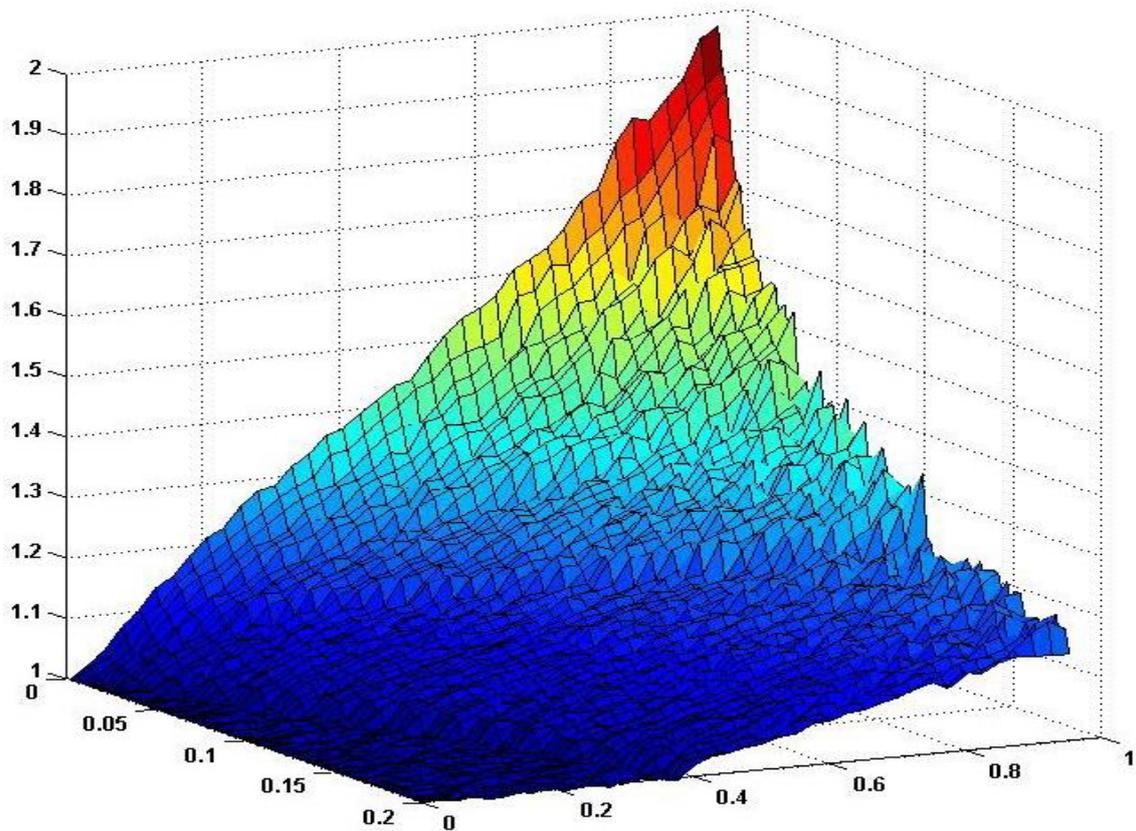


Рис. 1. Зависимость ожидаемого относительного выигрыша в производительности σ от временных затрат на создание КТ δ и вероятности отказа ВМ q

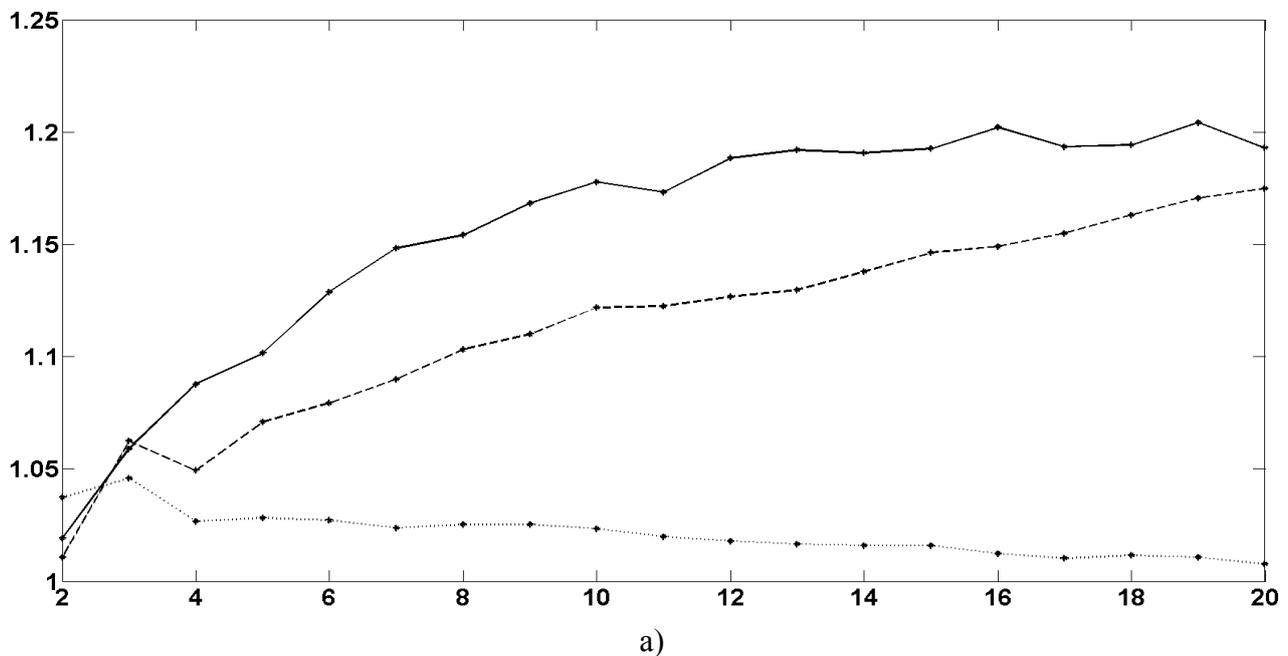


Рис. 2. Зависимость относительного выигрыша в производительности σ от количества ВМ (сплошная линия для $M = N$, штрихпунктир для $M = 2N$, короткий пунктир для $M = 5N$) (начало):
 $a - q=0,25$; $b - q=0,5$

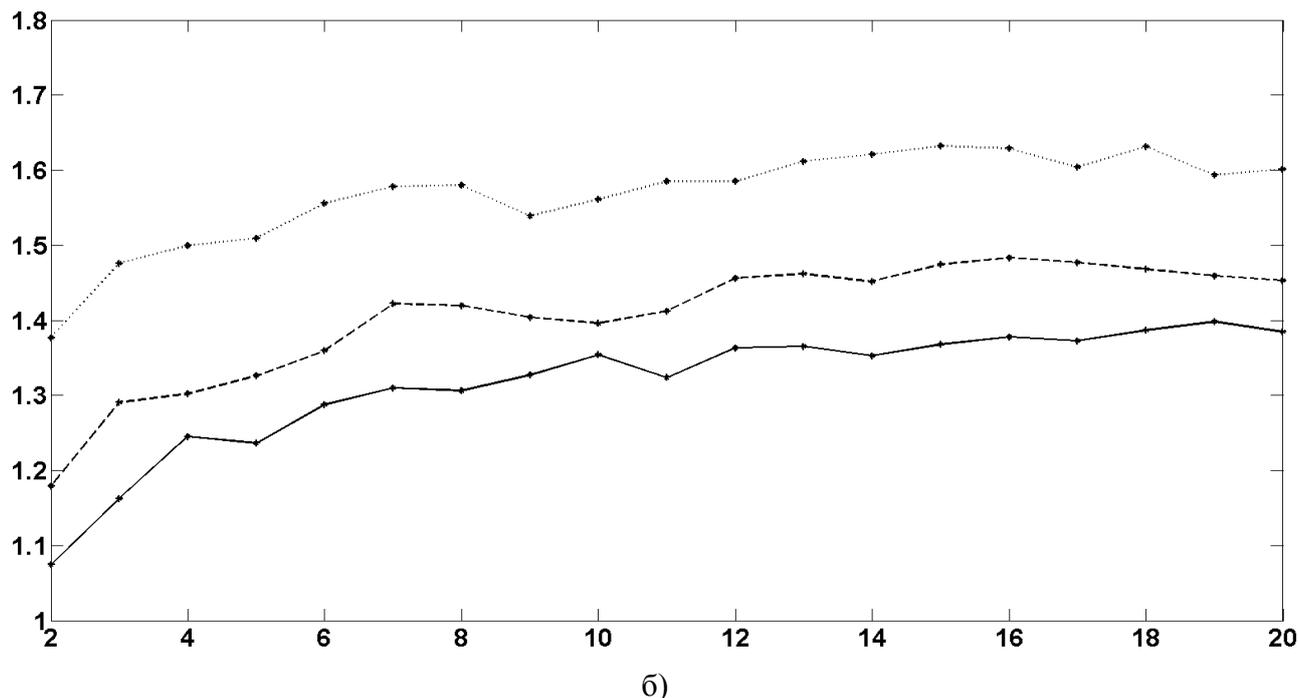


Рис. 2. Зависимость относительного выигрыша в производительности σ от количества ВМ (сплошная линия для $M=N$, штрихпунктир для $M=2N$, короткий пунктир для $M=5N$) (окончание):
 $a - q=0,25$; $b - q=0,5$

Наблюдаемые немонотонные выбросы значений σ можно объяснить дискретным изменением числа k интервалов и не в полной мере учтенными, по-видимому, особенностями его округления до целого в формуле (6). Таким образом, целесообразно в дальнейшем рассмотреть вопросы эффективности технологии сохранения и восстановления вычислительных процессов на основе КТ во взаимосвязи со структурой вычислительной системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ предложенного способа оптимизации количества КТ показал целесообразность его использования при разработке алгоритмов управления вычислительным процессом перспективных специализированных БВС, функционирующих в условиях деструктивного влияния неблагоприятных факторов различного происхождения. Результаты моделирования показали, что существует возможность обеспечить существенное снижение потерь производительности БВС при отказах ее компонентов в сравнении со способом организации вычислений без КТ, а также ранее известным способом расчета оптимальной периодичности сохранения состояния вычислительного процесса. Это позволит снизить потери от срыва целевых задач и повысить коэффициент оперативной готовности БВС.

Однако обсуждаемая тема далеко не исчерпана и требует дальнейшего исследования. К примеру, следовало бы рассмотреть неоднородные ВМ и неоднородные вычислительные задачи, учесть требуемые директивные сроки выполнения задач, различные варианты дисциплин обслуживания, разнообразные законы распределения отказов, перейти к стохастическим потокам задач и т. д., что потребует, надо полагать, использования более сложных моделей вычислительных систем и процессов имитационно-аналитического характера. Тем не менее проработка указанных вопросов позволит подготовить более обоснованные предложения по совершенствованию алгоритмов оперативного управления БВС и обеспечить требуе-

мые уровни показателей устойчивости вычислительных процессов на борту аэромобильных объектов.

Список используемых источников

1. *Захаров И. В.* Живучесть информационно-вычислительных систем группировок космических аппаратов в условиях дестабилизирующих факторов и деструктивных воздействий // *Военная мысль.* – 2017. – № 6. – С. 61–69.
2. *Поляков А. Ю., Данкина А. А.* Оптимизация времени создания и объема контрольных точек восстановления параллельных программ // *Вестник СибГУТИ.* – 2010. – № 2. – С. 87–100.
3. *Зыкова С. С.* Модель и алгоритм планирования параллельной обработки информации в отказоустойчивой бортовой вычислительной системе на основе временной избыточности вычислительного процесса // *Интеллектуальные технологии на транспорте.* – 2023. – № 4. – С. 28–34.
4. Метод отказоустойчивой параллельной обработки информации в бортовых вычислительных системах летательных аппаратов на основе временной избыточности вычислительного процесса / *А. Г. Басыров [и др.]* // *Авиакосмическое приборостроение.* – 2023. – Вып. № 6. – С. 33–39.

Е. В. Калмыков,
кандидат технических наук;
С. Н. Кирюхин,
кандидат технических наук, доцент;
В. О. Сайданов
доктор технических наук, профессор

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОЧЕГО ЦИКЛА ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ И ЕЕ ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Представлены математическая модель рабочего цикла двигателя внутреннего сгорания с газотурбинным наддувом в виде открытой термодинамической системы и ее программное обеспечение, которое позволяет выполнять расчеты рабочих процессов как в обычных условиях эксплуатации, так и в специфических условиях при работе двигателя в составе энергетической установки на объектах военной инфраструктуры различного назначения. Результаты моделирования могут выводиться на цифровые дисплеи, виртуальные графопостроители или осциллографы.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, рабочий процесс, условия эксплуатации, математическая модель, программная реализация, численные значения параметров.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время основу резервного и автономного электроснабжения объектов военной инфраструктуры различного назначения составляют дизельные энергетические установки (ДЭУ) [1]. Особенности объектов определяют неблагоприятные условия эксплуатации ДЭУ, такие как функционирование с резко-переменными суточными и сезонными нагрузками, длительная работа дизелей на режимах долевых нагрузок и с повышенными сопротивлениями газовоздушных трактов [2].

Условия эксплуатации существенно влияют на рабочий процесс дизельного двигателя, который определяет следующие его показатели:

- мощностные;
- экономические;
- ресурсные.

Для оценки степени влияния на рабочие показатели двигателей таких факторов, как условия эксплуатации, их конструктивные особенности, вид и состав применяемого топлива широко используются расчетные методы исследования рабочих процессов двигателей с помощью математических моделей [3].

Предлагаемая математическая модель рабочего цикла двигателя в виде открытой термодинамической системы была реализована с помощью матричной системы MATLAB (MATrix LABoratory версия 7/R2007) и ее пакета расширения *Simulink* 6 [4]. Это позволило объединить имеющиеся методы расчета всей совокупности элементов модели разного уровня сложности в единый программный продукт.

На рис. 1 представлена структурная схема модели.

Функционально структура модели содержит на момент публикации пять блоков (рис. 1): 1 – блок исходных данных (*Vozduh_Smesj*); 2 – блок расчета параметров агрегата наддува (*Kompressor*); 3 – блок расчета конструктивных характеристик двигателя и впускного коллектора (*Kollektor*); 4 – блок расчета параметров рабочего процесса двигателя (*Dizel*) и 5 – блок расчета параметров турбины (*Turbina*).

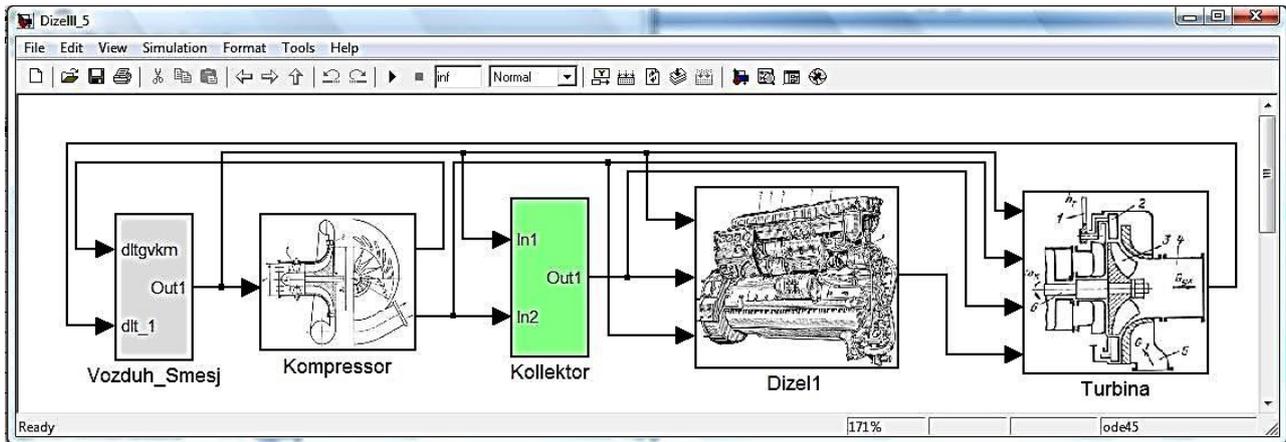


Рис. 1. Структурная схема модели

БЛОК ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

В блоке исходных данных применительно к конкретному двигателю задаются следующие исходные данные:

- абсолютное давление P'_k (в Па) и абсолютная температура T'_k (в К) рабочего тела;
- состав рабочего тела и молекулярные массы отдельных его компонентов;
- вид и элементарный состав топлива;
- углы начала открытия и закрытия органов газораспределения;
- частота вращения коленчатого вала n ;
- конструктивные параметры (число цилиндров i ; диаметр d и ход поршня s ; средняя скорость поршня C_m ; коэффициент тактности z ; параметр $\lambda = R/L$, где R – радиус кривошипа коленчатого вала, L – длина шатуна; геометрическая степень сжатия ϵ ; площадь поверхности поршня F_{nn} и другие данные – всего 37 параметров). При этом каждый параметр может изменяться в процессе моделирования с помощью специального модуля *Slider*.

БЛОК РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ АГРЕГАТА НАДДУВА

В данном блоке сначала с помощью регрессионных уравнений характеристик агрегата наддува (АН) определяются два показателя его функционирования – степень повышения давления π_k и адиабатный коэффициент полезного действия (КПД) $\eta_{ад}^k$:

$$\pi_k = a_0 + a_1 \cdot G_k \cdot n_{tk} + a_2 \cdot G_k^2 + a_3 \cdot n_{tk}^2, \quad (1)$$

$$\eta_{ад}^k = b_0 + b_1 \cdot G_k + b_2 \cdot n_{tk} + b_3 \cdot G_k \cdot n_{tk} + b_4 \cdot G_k^2 + b_5 \cdot n_{tk}^2, \quad (2)$$

где a_i, b_i – коэффициенты множественной регрессии характеристик АН;
 n_{tk} – начальное значение частоты вращения вала АН;
 G_k – начальное значение массового расхода рабочего тела.

По найденным значениям π_k и $\eta_{ад}^k$ определяются давление P_k'' и температура T_k'' рабочего тела на выходе из АН:

$$T_k'' = T_k' \left(1 - \frac{\pi_k^{m_k - 1}}{\eta_{ад}^k} \right), \quad (3)$$

$$m_k = \frac{k}{k - 1}, \quad (4)$$

где k – показатель адиабаты рабочего тела.

Совместная работа поршневой части двигателя и АН предполагает соблюдение равенства расходов рабочего тела через них, т. е. $G_d = G_k$.

Расход рабочего тела через двигатель определяется по формуле

$$G_d = \frac{P_k}{R \cdot T_k} \cdot V_s \cdot i \cdot z \cdot n \cdot \frac{1}{60} \cdot \eta_n \cdot \varphi_a, \quad (5)$$

где V_s – рабочий объем цилиндра;

i – число цилиндров;

z – коэффициент тактности;

P_k и T_k – давление и температура рабочего тела перед впускными органами двигателя;

η_n и φ_a – коэффициенты наполнения и продувки соответственно.

Численные значения параметров представленного уравнения, изменяющихся с изменением T'_k , P'_k , P''_k , рассчитываются следующим образом. Давление после охладителя наддувочного воздуха $P_k = P''_k - \Delta P_{ВП}$, где $\Delta P_{ВП}$ – потери давления рабочего тела на участке от выходного фланца АН до входа во впускной коллектор двигателя.

Так как в рассматриваемой модели $n = \text{const}$, то предполагается, что скорость рабочего тела, которая при неизменной конструкции впускного тракта определяет величину $\Delta P_{ВП}$, также остается постоянной, и, следовательно, $\Delta P_{ВП} = \text{const}$. В соответствии с ГОСТ 10598–82 перепад давления в воздушной полости охладителя наддувочного воздуха, а именно этот перепад составляет основную долю перепада $\Delta P_{ВП}$, не должен превышать 1,75% от P_k и не должен быть более 0,005 МПа. Из-за отсутствия достоверной информации о величине $\Delta P_{ВП}$ для конкретного дизеля в модели принято $\Delta P_{ВП} = 0,005$ МПа.

Температура рабочего тела на выходе из охладителя наддувочного воздуха (во впускном коллекторе) T''_k определяется по приближенной формуле с учетом параметров охлаждающей жидкости и КПД охладителя:

$$T''_k = \frac{T_k - \eta_{охл} T_{вод}}{1 - \eta_{охл}}, \quad (6)$$

где $\eta_{охл}$ – КПД охладителя;

$T_{вод}$ – температура охлаждающей жидкости.

Так как при большом диапазоне изменения T''_k коэффициент теплопередачи изменяется незначительно, то в модели АН принят линейный характер изменения зависимости $k = f(T''_k)$. При таком допущении температура T_k определяется из уравнения

$$\ln(T_k - T_{охл}) \cong \ln(T''_k - T_{охл}) - \frac{k \cdot F_x}{c_p \cdot G_k}, \quad (7)$$

где F_x – поверхность теплообмена;

c_p – удельная изобарная теплоемкость рабочего тела.

Завершающим этапом расчета в данном блоке является определение адиабатной мощности АН, необходимой для сжатия рабочего тела:

$$N_{ад}^к = G_k \cdot C_{P_k} \cdot (T''_k - T'_k), \quad (8)$$

где C_{P_k} – истинная массовая изобарная теплоемкость рабочего тела.

БЛОК РАСЧЕТА КОНСТРУКТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГАТЕЛЯ И ВПУСКНОГО КОЛЛЕКТОРА

В данном блоке расчета вычисляются следующие параметры:

– начальное значение цикловой подачи топлива $b_{ц}$;

– текущее значение степени сжатия ϵ ;

– текущее значение площади поверхности теплообмена F_x ;

- параметры состояния рабочего тела к началу сжатия: средняя температура стенок камеры сгорания, величина подогрева заряда рабочего тела вследствие теплообмена со стенками камеры сгорания, температура и коэффициент остаточных газов;
- коэффициент гидравлических потерь впускных клапанов;
- шаг интегрирования системы дифференциальных уравнений и другие данные (всего 24 параметра).

Основные модели рабочих процессов двигателя для стандартных условий эксплуатации, когда в качестве рабочего тела рассматривается либо атмосферный воздух, либо смесь воздуха и «чистых» продуктов сгорания, достаточно давно и широко представлены в работах многих ученых. Наиболее значительными в этом плане являются труды В. И. Гриневецкого, Е. К. Мазинга, Н. М. Глаголева, Б. С. Стечкина, И. И. Вибе, Н. К. Шокотова, Б. М. Гончара, Б. Н. Семенова, Р. М. Петриченко, О. Г. Красовского и др. В практике отечественного двигателестроения наибольшее распространение получила методика Б. М. Гончара, в основном известная в литературе как методика ЦНИДИ [5] численного моделирования рабочего процесса двигателя. Данная методика положена в основу разрабатываемой модели рабочего процесса двигателя.

Методика ЦНИДИ рассматривает рабочее тело как идеальный газ, что вполне допустимо при высоких температурах и давлениях в цилиндре. Кроме того, она не учитывает потери теплоты, возникающие в результате испарения топлива, поданного в цилиндр; диссоциации молекул продуктов сгорания; утечек рабочего тела через неплотности при закрытых органах газораспределения.

С учетом сформулированных допущений в основу модели положены характеристическое уравнение идеального газа, уравнение первого начала термодинамики и уравнение материального баланса, которые в совокупности представляют собой следующую систему уравнений (9):

$$\begin{cases} PV = G_{\text{рт}} R_{\text{рт}} T; \\ \frac{dQ_m}{d\varphi} + \frac{dQ_w}{d\varphi} = C_{V_{\text{рт}}} G_{\text{рт}} \frac{dT}{d\varphi} + P \frac{dV}{d\varphi}; \\ r_{\text{O}_2} + r_{\text{CO}_2} + r_{\text{H}_2\text{O}} + r_{\text{N}_2} + r_x = 1, \end{cases} \quad (9)$$

- где P, V, T – соответственно давление, объем и температура рабочего тела в цилиндре двигателя в момент времени, определяемый текущим значением угла поворота φ коленчатого вала двигателя;
- $G_{\text{рт}}$ – массовый расход рабочего тела в цилиндре двигателя в момент времени, определяемый текущим значением угла поворота φ коленчатого вала двигателя;
- $C_{V_{\text{рт}}}$ – массовая изохорная теплоемкость рабочего тела в момент времени, определяемый текущим значением угла поворота φ коленчатого вала двигателя;
- $R_{\text{рт}}$ – газовая постоянная рабочего тела;
- dQ_m – изменение количества теплоты, выделяемого при сгорании топлива в момент времени, определяемый текущим значением угла поворота φ коленчатого вала двигателя;
- dQ_w – изменение количества теплоты, отдаваемого при теплообмене стенкам рабочей полости цилиндра в момент времени, определяемый текущим значением угла поворота φ коленчатого вала двигателя;
- $r_{\text{O}_2}, r_{\text{CO}_2}, r_x$ – соответственно, объемные концентрации кислорода, углекислого газа и какого-либо другого компонента рабочего тела в цилиндре двигателя в момент времени, определяемый текущим значением угла поворота φ коленчатого вала двигателя.

После подстановки величины P из первого уравнения системы (9) во второе и ряда преобразований получим

$$\frac{dT}{d\varphi} = \frac{1}{C_{V_{CM}} G_{CM}} \left(\frac{dQ_m}{d\varphi} + \frac{dQ_w}{d\varphi} - \frac{G_{PT} R_{PT} T}{V} \frac{dV}{d\varphi} \right). \quad (10)$$

Расчет значений величин $\frac{dQ_m}{d\varphi}$ выполняется по известным уравнениям И. И. Вибе [6]:

$$\frac{dQ_m}{d\varphi} = Q_H b_{ц} \frac{dx}{d\varphi}; \quad (11)$$

$$\frac{dx}{d\varphi} = A \frac{m+1}{\varphi_z} \left(\frac{\varphi}{\varphi_z} \right)^m e^{-A \left(\frac{\varphi}{\varphi_z} \right)^{m+1}}; \quad (12)$$

$$x = 1 - e^{-A \left(\frac{\varphi}{\varphi_z} \right)^{m+1}}, \quad (13)$$

где Q_H – низшая теплотворная способность топлива;
 $b_{ц}$ – цикловая подача топлива;
 $\frac{dx}{d\varphi}$ – скорость горения топлива;

m – показатель сгорания;

φ_z – продолжительность сгорания;

φ – текущий угол поворота коленчатого вала;

A – постоянный коэффициент, зависящий от максимальной доли сгоревшего топлива x_{\max}).

Расчет значений величин $\frac{dQ_w}{d\varphi}$ выполняется по уравнению Ньютона – Рихмана:

$$\frac{dQ_w}{d\varphi} = \frac{T_w - T}{3600 \cdot n \cdot 6} \alpha_q F_x, \quad (14)$$

где T_w – средняя температура стенок камеры сгорания;

n – частота вращения коленчатого вала двигателя;

α_q – коэффициент теплоотдачи;

F_x – текущая тепловоспринимающая поверхность цилиндра.

Расчет значений коэффициента теплоотдачи α_q в уравнении Ньютона – Рихмана (14) определяется по формуле Эйхельберга [7]:

$$\alpha_q = C_{\text{Э}} \sqrt[3]{C_m} \sqrt{PT}, \quad (15)$$

где $C_{\text{Э}}$ – постоянный коэффициент;

C_m – средняя скорость поршня.

Вместе с тем следует заметить, что величина постоянного коэффициента $C_{\text{Э}}$ в формуле (15) в обязательном порядке должна уточняться по условию равенства действительной (определяется в результате экспериментальных исследований) и расчетной теплоотдачи от рабочего тела к стенкам цилиндра.

Применяя численные методы интегрирования дифференциального уравнения (9) (в модели используется метод Рунге – Кутты четвертого порядка с шагом интегрирования $\Delta\varphi = 2^\circ$ п.к.в.), получим расчетную зависимость $T = f_1(\varphi)$, по которой строятся индикаторные диаграммы: расчетная развернутая – $P = f_2(\varphi)$ и свернутая – $P = f_3(V)$.

По индикаторным диаграммам определяется величина индикаторной работы цикла L_i , с помощью которой рассчитываются остальные индикаторные показатели (среднее индикаторное давление P_i , индикаторная мощность N_i , индикаторный КПД η_i):

$$p_i = \frac{L_i}{V_s}, \quad (16)$$

$$N_i = p_i V_s i z \frac{n}{60}, \quad (17)$$

$$\eta_i = \frac{V_s}{Q_H b_{\text{ц}}} p_i. \quad (18)$$

Далее, с учетом значения механического КПД двигателя η_m определяются эффективные показатели двигателя. При этом для определения величины η_m используются рекомендации работы [8], где, задаваясь предварительным значением η_{m1} , с помощью метода последовательных приближений рассчитывается значение η_m по регрессионной зависимости:

$$\eta_m = \frac{0,9674 \cdot P_i \cdot \eta_{m1}}{P_i \cdot \eta_{m1} + 6657 \cdot n^{0,428}}, \quad (19)$$

где η_{m1} – предварительное значение механического КПД двигателя.

БЛОК РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ТУРБИНЫ

В данном блоке расчета вычисляются следующие параметры:

- температура рабочего тела перед турбиной (T'_t);
- теплоперепад, срабатываемый в турбине ($\overline{H_{T^*}}$);
- пропускная способность турбины (μF);
- относительный КПД турбины (η_0^T);
- эффективная мощность турбины ($N_{\text{эф}}^T$);
- температура рабочего тела (отработанных газов) после турбины (T''_t);
- коэффициент запаса устойчивости компрессора по помпажу ($K_{\text{зп}}$).

Рабочее тело перед турбиной представляет собой газовую смесь, состоящую из отработанных газов (продуктов сгорания топлива) и продувочного воздуха. Температура рабочего тела перед турбиной может быть определена по формуле

$$T'_t = \frac{T''_d + T_k \cdot (\varphi_a - 1)}{\varphi_a}, \quad (20)$$

где T''_d – температура отработанных газов за выпускными органами газораспределения,

$$T''_d = T_b \left(\frac{P_b}{P'_T} \right)^{\frac{1-n_{\Gamma}}{n_{\Gamma}}}. \quad (21)$$

Здесь T_b и P_b – соответственно температура и давление отработанных газов в момент открытия выпускного органа газораспределения;

P'_T – давление отработанных газов перед рабочим колесом турбины

n_{Γ} – условный показатель политропы «расширения» газов при выпуске из цилиндра;

T_k – температура продувочного воздуха перед впускными органами газораспределения;

φ_a – коэффициент продувки.

Для определения срабатываемого теплоперепада в турбине задаемся предварительным значением величины условно постоянного давления P'_T .

Срабатываемый теплоперепад в турбине определяется по следующей формуле:

$$\overline{H_{T^*}} = \frac{2C_{pT} \cdot (T'_t - T''_{t\text{теор}})}{\pi \cdot D_t \cdot n_{tk}}, \quad (22)$$

где C_{pT} – массовая изобарная теплоемкость рабочего тела;

D_t – диаметр рабочего колеса турбины;
 $T_{\text{теор}}''$ – теоретическая температура рабочего тела за турбиной,

$$T_{\text{теор}}'' = \frac{T_t'}{\left(\frac{P_T'}{P_T''}\right)^{m_T}}. \quad (23)$$

Здесь P_T'' – давление отработанных газов за выпускными органами газораспределения;

m_T – показатель степени; $m_T = \frac{k_T - 1}{k_T}$, где k_T – показатель адиабаты расширения рабочего тела в турбине;

n_{tk} – значение частоты вращения вала турбины.

Пропускная способность турбины μF определяется по регрессионному уравнению

$$\mu F = C_0 + C_1 \cdot \overline{H}_{T^*} + C_2 \cdot \overline{H}_{T^*}^2 + C_3 \cdot \overline{H}_{T^*}^3, \quad (24)$$

где C_0, C_1, C_2, C_3 – коэффициенты регрессии, которые получены посредством аппроксимации графических зависимостей полиномами Чебышева [9].

Численное значение газодинамической функции турбины – ψ_T , необходимой для уточнения значения P_T' , определяется по формуле

$$\psi_T = \sqrt{\frac{2}{m_T} [1/(P_T'/P_T'')^{m_T} - 1/(P_T'/P_T'')^{(k_T+1)/k_T}]}, \quad (25)$$

в которой

$$P_T' = G_T \frac{\sqrt{R_{\text{пр}} T_t'}}{\psi_T \cdot \mu F}. \quad (26)$$

В формуле (26) G_T – расход рабочего тела через турбину, определяемый как

$$G_T = G_D + B, \quad (27)$$

где B – расход топлива.

Если расчетное значение величины P_T' совпало с предварительно принятым значением, то этот этап расчета является законченным, если – нет, то значение P_T' уточняется и расчет повторяется.

Относительный КПД турбины рассчитывается по аппроксимированной зависимости

$$\eta_0^T = d_0 + d_1 \cdot \overline{H}_{T^*} + d_2 \cdot \overline{H}_{T^*}^2 + d_3 \cdot \overline{H}_{T^*}^3, \quad (28)$$

где d_0, d_1, d_2, d_3 – коэффициенты регрессии, которые получены посредством аппроксимации графических зависимостей полиномами Чебышева [9].

Далее в модели определяется эффективная мощность турбины:

$$N_{\text{эф}}^T = G_T \cdot \overline{H}_{T^*} \cdot \eta_0^T \cdot \eta_{\text{мех}}^{\text{TK}} \cdot K_G \cdot K_H \cdot K_{\eta}, \quad (29)$$

где η_0^T – механический КПД турбокомпрессора;

K_G – поправка на отклонение расхода рабочего тела через турбину;

K_H – поправка на отклонение срабатываемого теплоперепада;

K_{η} – поправка на отклонение КПД.

Поправочные коэффициенты K_G, K_H и K_{η} учитывают неравномерность давления рабочего тела перед турбиной и определяются по рекомендациям работы [10] в виде регрессионных уравнений с коэффициентами, которые получены посредством аппроксимации заводских

графических зависимостей полиномами Чебышева. Так как газовая турбина работает в режиме $P'_T \approx \text{const}$, коэффициенты K_G , K_H и K_η приняты равными единице.

При выполнении условия $N_{\text{эф}}^T = N_{\text{ад}}^K$ расчет в рассматриваемом блоке заканчивается определением температуры рабочего тела на выходе из турбины T_t'' и коэффициента запаса устойчивости компрессора по помпажу $K_{\text{зп}}$:

$$T_t'' = T_t' - (T_t' - T_{t_{\text{теор}}}'') \cdot \eta_0^T, \quad (30)$$

$$K_{\text{зп}} = \frac{G_k}{G_{\text{гр}}} \cdot \frac{\pi_{\text{гр}}}{\pi_k}, \quad (31)$$

где $G_{\text{гр}}$ – расход рабочего тела через компрессор на границе помпажа;
 $\pi_{\text{гр}}$ – степень повышения давления рабочего тела в компрессоре на границе помпажа при расходе $G_{\text{гр}}$, которая рассчитывается по регрессионным уравнениям с коэффициентами, полученными посредством аппроксимации заводских графических зависимостей полиномами Чебышева.

Согласно работе [11] численное значение $K_{\text{зп}}$ должно быть не менее 1,04–1,06.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Результаты моделирования рабочего цикла и расчета индикаторных и эффективных показателей работы двигателя представляются в процессе моделирования в трех вариантах пользовательского интерфейса:

- вывод численных значений расчетных параметров на цифровые дисплеи (рис. 2.);
- вывод графических зависимостей на виртуальные графопостроители (рис. 2.);
- вывод временных диаграмм расчета основных показателей с помощью виртуальных осциллографов (рис. 3.).

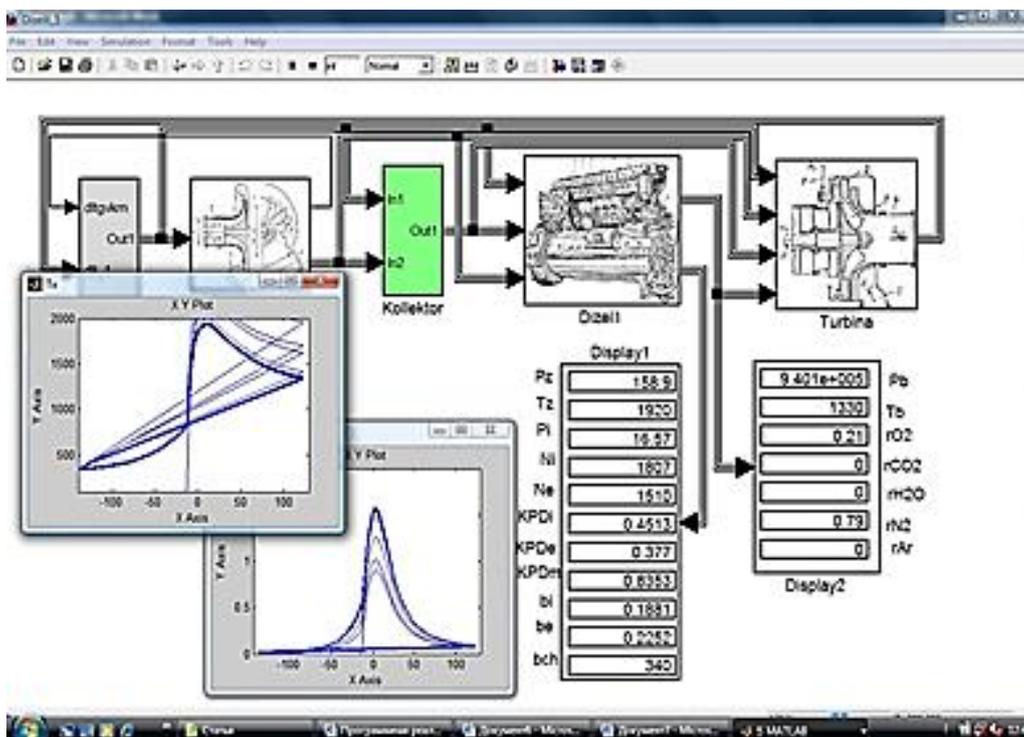


Рис. 2. Пользовательский интерфейс с цифровыми дисплеями и графопостроителями

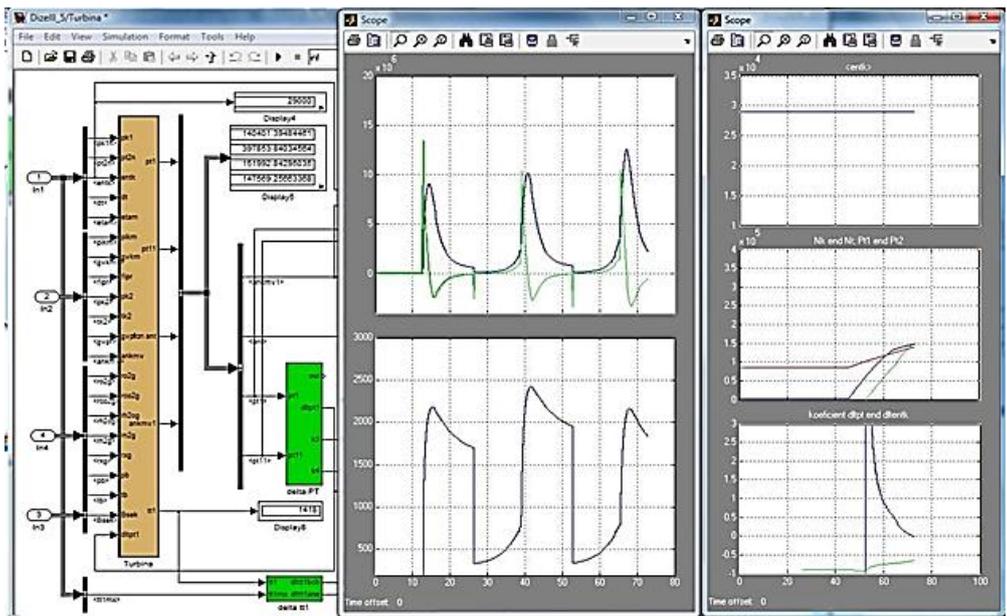


Рис. 3. Пользовательский интерфейс с виртуальными осциллографами

ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ДВИГАТЕЛЯ 18ЧН18/20 ПРИ РАБОТЕ НА ГАЗОБРАЗНОМ ТОПЛИВЕ

Для проверки адекватности разработанной модели, используя t -критерий Стьюдента для доверительного интервала 0,95, произведена оценка изменения мощностных и эффективных показателей работы двигателя 18ЧН18/20 по нагрузочным характеристикам (в соответствии с ГОСТ 10448-2014, ГОСТ Р ИСО 8528-6-2005), результаты которой показаны на рис. 4 и 5.

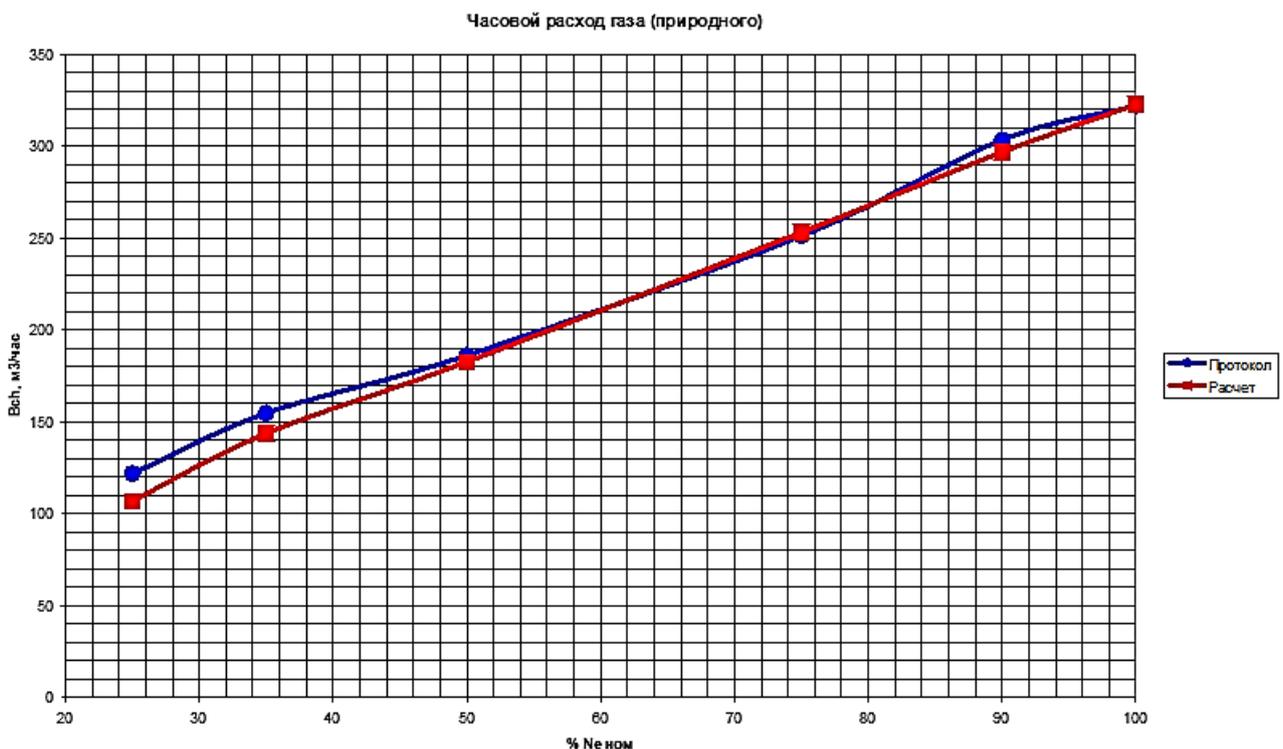


Рис. 4. Проверка адекватности модели. Часовой расход топлива (природный газ)

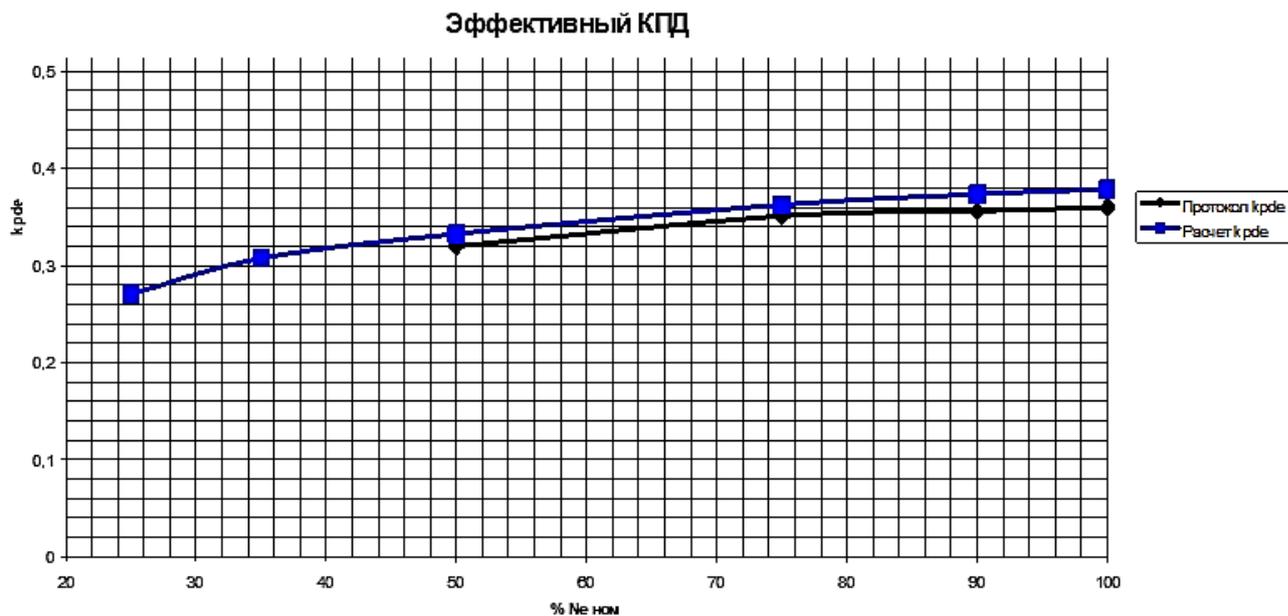


Рис. 5. Проверка адекватности модели. Эффективный КПД двигателя

В качестве примера на рис. 6–8 представлены результаты моделирования рабочих процессов двигателя 18ЧН18/20 при работе на метано-водородных смесях различного состава.

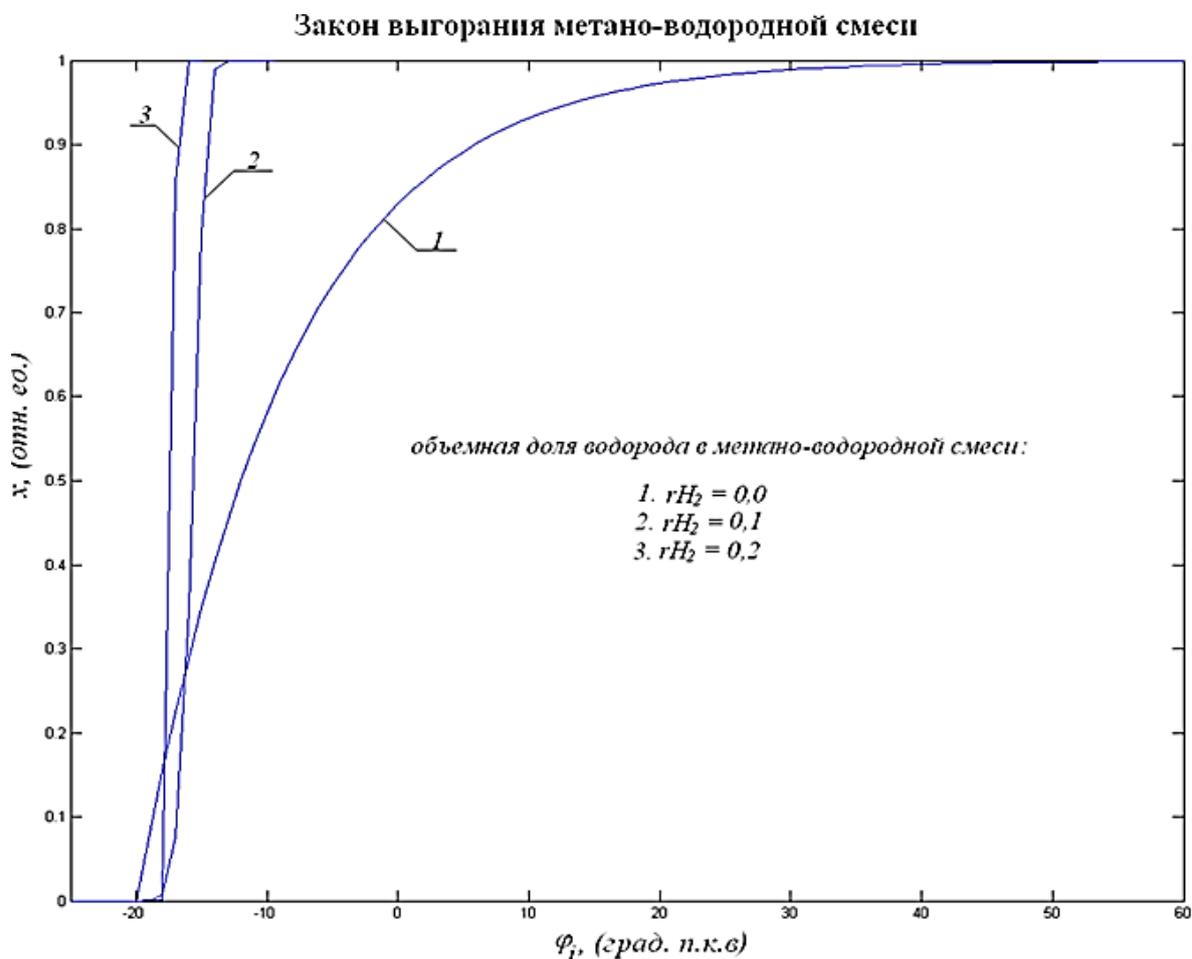


Рис. 6. Результаты моделирования рабочих процессов в цилиндрах двигателя 18ЧН18/20. Закон выгорания топлива

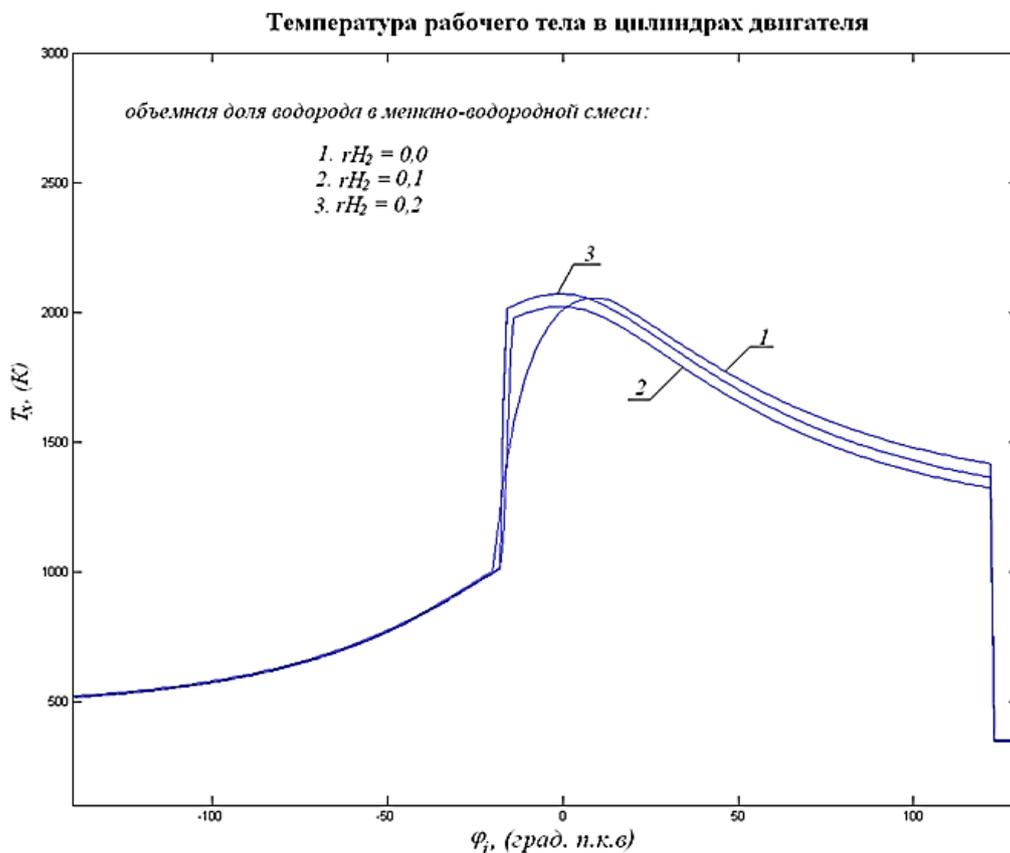


Рис. 7. Результаты моделирования рабочих процессов в цилиндрах двигателя 18ЧН18/20. Изменение температуры рабочего тела в рабочем цикле

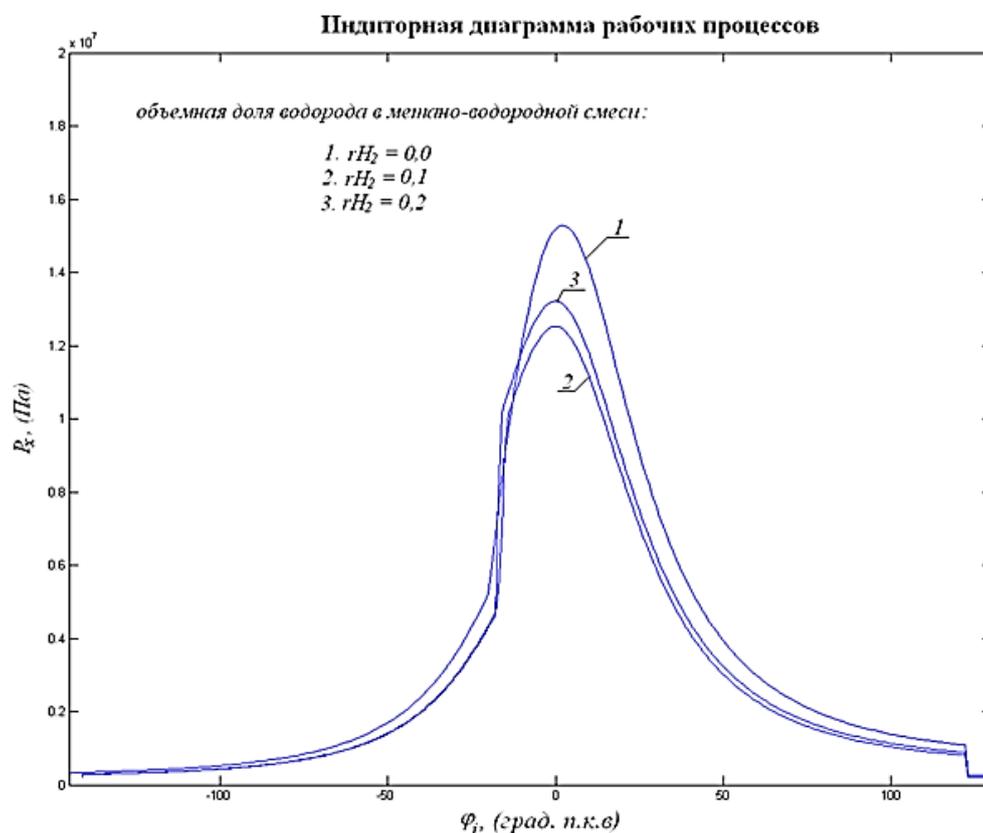


Рис. 8. Результаты моделирования рабочих процессов в цилиндрах двигателя 18ЧН18/20. Индикаторные диаграммы рабочих процессов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана математическая модель рабочего цикла дизельного двигателя в виде открытой термодинамической системы. Модель реализована с помощью матричной системы MATLAB (MATrix LABoratory версия 7/R2007) и ее пакета расширения *Simulink* 6.

Созданный программный продукт позволяет моделировать рабочий процесс как в обычных условиях эксплуатации, так и при изменении физико-химического состава рабочего тела, а также дает возможность изучать влияние различных факторов (например, повышенных сопротивлений газоздушных трактов) на основные показатели рабочего процесса двигателя при заданных ограничительных параметрах (максимальное давление и максимальная температура цикла, температура выпускных газов и др.).

Достоверность разработанных математических описаний и программных реализаций подтверждена адекватностью полученных результатов моделирования и позволяет проводить исследования рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания, функционирующих в различных условиях эксплуатации.

Список используемых источников

1. Сайданов В. О. Анализ номенклатуры, технического состояния и опыта эксплуатации ДГУ на объектах военной инфраструктуры // Двигателестроение. – 2015. – № 4 (262). – С. 8–9.
2. Сайданов В. О., Смолинский С. Н., Булат Р. Е. Концепция децентрализованного энергоснабжения объектов МО РФ и проблемы подготовки военных инженеров-энергетиков // Двигателестроение. – 2015. – № 2 (260). – С. 28–32.
3. Кирюхин С. Н., Толмачев В. Н., Журавский М. А. Улучшение эксплуатационных характеристик газовых двигателей с помощью изменения состава топлива // Газовая промышленность (спец. вып.). – 2015. – № 728. – С. 67–75.
4. Дьяконов В. П. SIMULINK 5/6/7 : самоучитель. – М. : ДМК-Пресс, 2023. – 786 с.
5. Дизели : справочник / под ред. В. А. Ваншейдта. – Л. : Машиностроение, 1977. – 479 с.
6. Вибе И. И. Новое о рабочем цикле двигателя. – М. : Машгиз, 1962. – 270 с.
7. Петриченко Р. М. Физические основы внутрицилиндровых процессов в двигателях внутреннего сгорания. – Л. : Изд-во Ленингр. ун-та, 1983. – 244 с.
8. Брук М. А., Виксман А. С., Левин Г. Х. Работа дизеля в нестационарных условиях. – Л. : Машиностроение, 1981. – 207 с.
9. Бахвалов Н. С., Жидков Н. П., Кобельков Г. М. Численные методы. – 3-е изд. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004. – 248 с.
10. Байков Е. И., Бордуков В. Г., Иванов П. В. Турбокомпрессоры для наддува дизелей : справочное пособие. – Л. : Машиностроение, 1975. – 200 с.
11. Котляр Н. В. Частичные и переходные режимы работы судовых газотурбинных установок. – Л. : Судостроение, 1966. – 294 с.

А. Н. Калюта,
кандидат технических наук;
Г. Н. Мальцев,
доктор технических наук, профессор;
Д. В. Склемин,
кандидат технических наук

ДОСТОВЕРНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Представлены аналитические зависимости, определяющие достоверность технического диагностирования сложных технических систем (СТС). Формализованное описание процесса технического диагностирования СТС выполнено с использованием диагностических моделей. Диагностические модели представляют собой множества видов технических состояний, представленных в базе данных по ситуациям функционирования СТС. Признак технического состояния объекта диагностирования формируется при соответствии вектора его контролируемых параметров вектору параметров технического состояния из базы данных. Рассмотрены несколько подходов для оценки определения вероятностных показателей достоверности технического диагностирования СТС: апостериорная вероятность правильного определения вида технического состояния и результирующая вероятность правильного диагностирования технического состояния объекта диагностирования. Представлены результаты расчетов показателей достоверности технического диагностирования СТС при различных вероятностях ошибок первого и второго рода в процессе контроля диагностических параметров.

Ключевые слова: диагностирование, достоверность, техническое состояние, ложный отказ, необнаруживаемый отказ, вероятность.

ВВЕДЕНИЕ

Современные системы и комплексы космического назначения представляют собой сложные технические системы (СТС), предназначенные для непрерывного применения или поддержания готовности к применению. В практике их испытаний и эксплуатации проводится техническое диагностирование, в результате которого техническое состояние СТС, выступающей в качестве объекта диагностирования, определяется с точностью, необходимой для распознавания ситуации функционирования – обнаружения признаков неисправностей и причин отказов [1, 2]. Важнейшим показателем технического диагностирования является достоверность, которая отражает степень обоснованности решений о техническом состоянии объекта диагностирования и определяет уровень доверия к полученным результатам диагностирования. Обратный по своей сути характер задачи технического диагностирования и влияние различных случайных факторов на оценку параметров объекта диагностирования приводят к тому, что достоверность технического диагностирования СТС характеризуется вероятностными показателями распознавания технического состояния объекта диагностирования в расширенном пространстве состояний, соответствующем множеству всех возможных технических состояний, в которых он может находиться в неисправном (неработоспособном) состоянии при возникновении различных неисправностей.

На достоверность технического диагностирования, как степени объективного соответствия результатов диагностирования действительному техническому состоянию объекта диагностирования, в общем случае влияют характеристики как объекта диагностирования, так и системы диагностирования. Прежде всего – глубина и полнота диагностирования. При этом для СТС описание распознаваемых видов технического состояния, как ситуаций функционирования, осуществляется с помощью диагностических моделей, разработка и верификация которых являются самостоятельной задачей [3]. В настоящей статье представлено формализованное описание процесса технического диагностирования СТС с использованием

диагностических моделей и исследованы вероятностные показатели достоверности технического диагностирования при достаточно общих предположениях об описании конечного множества технических состояний объекта диагностирования диагностическими моделями.

ФОРМАЛИЗОВАННОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СЛОЖНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Техническое диагностирование – это задача многоальтернативного контроля. Определение (распознавание) вида технического состояния объекта диагностирования с определенной точностью (уровнем детализации) является основной задачей технического диагностирования [2, 4]. Выбор состава параметров, подлежащих контролю при техническом диагностировании, обоснование допусков на выбранные параметры, выбор и обоснование технических характеристик средств контроля и диагностирования осуществляются на этапе проектирования СТС. На этом же этапе формируется база данных по ситуациям их функционирования, которая в дальнейшем может уточняться в процессе эксплуатации.

В качестве вектора входных данных для решения задачи технического диагностирования выступает вектор параметров объекта диагностирования. При техническом диагностировании систем и комплексов космического назначения такими данными являются данные систем встроенного диагностического контроля технических систем наземных комплексов и передаваемые с космических аппаратов данные телеметрического контроля бортовых технических систем [5, 6]. В соответствии с диагностической моделью функционирования объекта диагностирования вектор входных данных преобразуется в вектор параметров технического состояния, по которому с использованием известных признаков определяется (распознается) текущее техническое состояние из множества видов технических состояний, представленных в базе данных. Признаком технического состояния является совокупность свойств результатов оценки параметров объекта диагностирования, позволяющих сделать вывод о виде его технического состояния. Каждому техническому состоянию соответствует некоторый вектор входных данных, который позволяет судить о возникновении различных неисправностей и о причинах отказов.

Диагностические модели определяют соответствие набора признаков и значений соответствующих им контролируемых параметров различным техническим состояниям объекта диагностирования. По сути, диагностические модели являются эталонными образами, заданными на уровне некоторого словаря контролируемых признаков, по которым осуществляется распознавание технического состояния объектов диагностирования как ситуаций их функционирования [7, 8]. Каждому техническому состоянию должна соответствовать конкретная реализация словаря признаков или конкретная диагностическая модель. При этом каждому из распознаваемых видов технического состояния $TС_j$ для обеспечения условия их наблюдаемости должна соответствовать хотя бы одна диагностическая модель M_i , но одна и та же модель не должна соответствовать разным техническим состояниям, как это показано на рис. 1. Поэтому при решении задачи технического диагностирования необходимо выбрать рациональное конечное число технических состояний, которые могут быть различимы при контроле.

Случайный характер возникновения неисправностей и ошибок, возникающих при техническом диагностировании, приводит к тому, что основными показателями достоверности технического диагностирования СТС являются вероятностные показатели. Задачам технического диагностирования систем и комплексов космического назначения в процессе испытаний и наземной и летной эксплуатации в наибольшей степени соответствуют апостериорные вероятностные показатели, характеризующие вероятность того, что в результате техническо-

го диагностирования вид технического состояния объекта диагностирования определен правильно и соответствует ее действительному техническому состоянию.

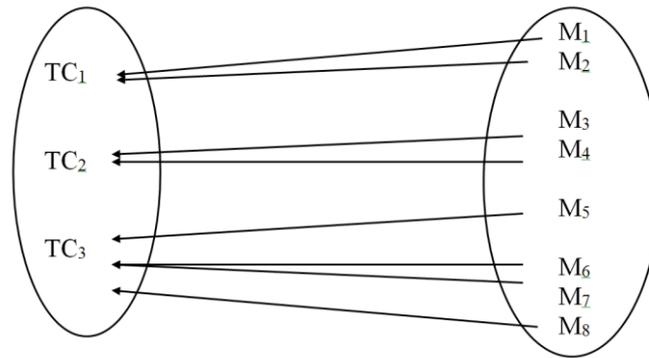


Рис. 1. Взаимосвязь диагностических моделей и технических состояний

Пусть задано множество из N технических состояний объекта диагностирования S_1, S_2, \dots, S_N , подлежащих распознаванию и соответствующих определенной глубине поиска места отказа (неисправности). Вследствие влияния различных случайных факторов, результаты технического диагностирования – оценки технического состояния объекта диагностирования $\hat{S}_1, \hat{S}_1, \dots, \hat{S}_N$ – могут соответствовать и не соответствовать его истинному техническому состоянию. Правильной оценкой технического состояния объекта диагностирования S_j будем полагать оценку \hat{S}_i , если $i = j, i, j = 1, \dots, N$. Во всех остальных случаях при $i \neq j$ имеет место ошибка технического диагностирования. Тогда показатель достоверности технического диагностирования, как апостериорная вероятность правильного распознавания технического состояния объекта диагностирования, определяется в результате суммирования элементов матрицы соответствия технического состояния объекта диагностирования и результатов его оценивания:

$$D = 1 - \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^N P_{ij}. \tag{1}$$

В этой формуле $P_{ij} = P(\hat{S}_i / S_j)$ – вероятность того, что объект диагностирования находится в техническом состоянии S_j , а оценка его технического состояния системой диагностирования \hat{S}_i ; N – общее число возможных (известных) технических состояний объекта диагностирования, составляющих набор классов технических состояний, для которых определен словарь признаков.

Вероятности $P_{ij} = P(\hat{S}_i / S_j), i, j = 1, \dots, N$, входящие в выражение (1), могут быть представлены в виде матрицы вероятностей ошибок

$$P = \begin{bmatrix} 0 & P(\hat{S}_2 / S_1) & P(\hat{S}_j / S_1) & P(\hat{S}_N / S_1) \\ P(\hat{S}_1 / S_2) & 0 & P(\hat{S}_j / S_2) & P(\hat{S}_N / S_2) \\ P(\hat{S}_1 / S_i) & P(\hat{S}_2 / S_i) & 0 & P(\hat{S}_N / S_i) \\ P(\hat{S}_1 / S_N) & P(\hat{S}_2 / S_N) & P(\hat{S}_j / S_N) & 0 \end{bmatrix}. \tag{2}$$

Нулевые значения элементов матрицы вероятностей ошибок (2) соответствующие $i = j$, $i, j = 1, \dots, N$, отражают то обстоятельство, что эти элементы не учитываются при суммировании вероятностей $P_{ij} = P(\hat{S}_i / S_j)$ в выражении (1).

Выражение (1) и матрица (2) могут быть использованы для определения введенного показателя достоверности D как апостериорной вероятности правильного определения вида технического состояния объекта диагностирования, и в случае решения задачи контроля его технического состояния при $N = 2$ – при определении исправного (работоспособного) и неисправного (неработоспособного) состояний объекта диагностирования в целом. Матрица ошибок \mathbf{P} вида (2) при $N = 2$ включает апостериорные вероятности заключений системы контроля, в которой вероятности правильных заключений системы контроля, соответствующие $i = j$, $i, j = 1, 2$, согласно принципу построения матрицы ошибок \mathbf{P} заменяются на нулевые значения. В результате вероятностный показатель достоверности диагностирования (1) сводится к вероятностному показателю, рассмотренному в работах [9, 10].

Можно полагать, что до проведения технического диагностирования при наличии априорной информации о надежности объекта диагностирования величина показателя достоверности D оценки его технического состояния определяется величиной вероятности исправного состояния P . С учетом конечной достоверности технического диагностирования в результате выполнения диагностических процедур происходит увеличение величины показателя достоверности D от значения $D = P$ до значения, определяемого выражением (1) для множества характеризующих систему диагностирования вероятностей ошибок $P_{ij} = P(\hat{S}_i / S_j)$, $i, j = 1, \dots, N$, при формировании системой диагностирования оценки \hat{S}_i технического состояния объекта диагностирования S_j .

Для процесса технического диагностирования, как и для процесса контроля технического состояния, могут быть введены показатели достоверности в виде вероятностей ошибок первого и второго рода. Они формализуются для случая, когда диагностическая модель объекта диагностирования известна, оценка его технического состояния осуществляется по совокупности значений m диагностических параметров, и каждый параметр подвергается допусковому контролю с вероятностями ошибки первого рода α_i и второго рода β_i , $i = 1, \dots, m$. Иными словами, когда для каждого диагностического параметра решается двухальтернативная задача контроля. При этом общее число диагностических параметров в общем случае составляет $n \geq m$, и ситуация, когда $n > m$, соответствует наличию методической составляющей достоверности технического диагностирования, обусловленной неполнотой контроля, когда контролируются не все диагностические параметры.

Рассмотрим случай контроля всех диагностических параметров ($m = n$). Будем полагать, что ошибка диагностирования возникает, когда при контроле хотя бы одного из параметров происходит ошибка первого или второго рода. Тогда показатель достоверности диагностирования D , как результирующая вероятность правильного диагностирования технического состояния объекта диагностирования, определяется выражением

$$D = \prod_{i=1}^n (1 - \alpha_i - \beta_i), \quad (3)$$

где α_i – вероятность ошибки первого рода при контроле i -го диагностического параметра (параметр находится в поле допуска, а система диагностирования определяет его вне поля допуска);

β_i – вероятность ошибки второго рода при контроле i -го диагностического параметра (параметр находится вне поля допуска, а система диагностирования определяет его в поле допуска).

Очевидно, что должны рассматриваться ситуации, когда $\alpha_i < 0,5$; $\beta_i < 0,5$, $i = 1, \dots, n$.

В более общем случае при определении показателя достоверности технического диагностирования может учитываться важность правильной оценки различных технических состояний объекта диагностирования. Так, на этапе лётной эксплуатации космических аппаратов оценка наиболее важных технических состояний может проводиться по результатам многократных проверок и показатель достоверности диагностирования определяется для цикла проверок или для проверки с минимальной достоверностью технического диагностирования бортовой аппаратуры объектов ракетно-космической техники [11, 12].

Выражение (3) определяет величину показателя достоверности технического диагностирования в случае контроля всех диагностических параметров ($m = n$), когда отсутствует методическая составляющая достоверности диагностирования. В общем случае при контроле части диагностических параметров ($m < n$) данное выражение представляет собой показатель инструментальной составляющей достоверности технического диагностирования. При контроле части диагностических параметров также имеет место методическая составляющая достоверности технического диагностирования, обусловленная неполнотой контроля [11, 13].

Кроме того, методическая составляющая достоверности диагностирования может быть обусловлена неточностью используемых диагностических моделей по контролируемым параметрам, но данный случай в предположении наличия верифицированных диагностических моделей технического состояния объекта диагностирования, как ситуаций его функционирования, не рассматривается.

Для определения результирующего значения показателя достоверности технического диагностирования D с учетом методической составляющей в выражении (3) необходимо заменить общее число диагностических параметров n на число контролируемых диагностических параметров m и умножить ее показатель методической составляющей достоверности технического диагностирования D_m . В работах по достоверности измерительного контроля продукции [14] данная составляющая характеризуется как вероятность брака. Составляющая D_m определяется вероятностью работоспособного состояния объекта диагностирования по неконтролируемым $n-m$ параметрам, по которым

может произойти отказ, не обнаруживаемый системой диагностирования: $D_m = \prod_{i=m+1}^n P_i$, где P_i – вероятность исправного состояния по i -му диагностическому параметру, $i = m + 1, \dots, n$.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Результирующее выражение для показателя достоверности технического диагностирования в случае контроля части диагностических параметров ($m < n$) имеет следующий вид:

$$D = \prod_{i=1}^m (1 - \alpha_i - \beta_i) \prod_{i=m+1}^n P_i. \quad (4)$$

Анализ выражения (4) показывает, что если при измерении диагностических параметров и оценке по ним технического состояния объекта диагностирования уменьшается априорная неопределенность, то показатель достоверности технического диагностирования D является возрастающей функцией числа контролируемых диагностических параметров m . Практически зависимость величины D от числа контролируемых диагностических параметров m является более сложной и зависит от соотношения между величинами α_i , β_i и P_i , поскольку при высокой надежности объекта диагностирования возможные инструментальные ошибки при оценке диагностических параметров могут оказывать большее

влияние на показатель достоверности, чем методическая составляющая ошибки оценки технического состояния при уменьшении числа контролируемых диагностических параметров. Кроме того, по неконтролируемым параметрам невозможен ложный отказ.

Во всех случаях показатель достоверности технического диагностирования D монотонно увеличивается с увеличением вероятностей P_i , определяющих вероятность работоспособного состояния объекта диагностирования P . Если истинные значения диагностических параметров находятся в пределах своих допусков и точность измерения абсолютная, то $\alpha_i = 0$, $\beta_i = 0$, $i = 1, \dots, m$, и результирующее значение показателя достоверности D определяется методической составляющей достоверности технического диагностирования:

$D = D_m = \prod_{i=m+1}^n P_i$. Отсутствие технического диагностирования соответствует случаю, когда

$m = 0$. В этом случае методическая составляющая параметра достоверности технического

диагностирования составляет $D_m = P = \prod_{i=1}^n P_i$ и соответствует вероятности работоспособного

состояния объекта диагностирования к началу контроля его технического состояния P

(полагается, что при $m = 0$ выполняется $\prod_{i=1}^m (1 - \alpha_i - \beta_i) = 1$). При контроле всех диагнос-

тических параметров ($m = n$) и абсолютной точности их измерения ($\alpha_i = 0$, $\beta_i = 0$, $i = 1, \dots, n$)

методическая составляющая параметра достоверности технического диагностирования составляет $D_m = 1$ и результирующая значение показателя достоверности также составляет

$D = 1$ (полагается, что при $m = n$ выполняется $\prod_{i=m+1}^n P_i = 1$).

Таким образом, нижняя граница значений показателя достоверности технического диагностирования определяется вероятностью работоспособного состояния объекта

диагностирования $P = \prod_{i=1}^n P_i$, а верхняя граница соответствует единичному значению

при контроле всех диагностических параметров и абсолютной точности их измерения.

При равенстве вероятностей правильных и ошибочных решений α_i , β_i и вероятностей работоспособного состояния объекта диагностирования P_i , $i = 1, \dots, n$, для всех

диагностических параметров выражение (4) для показателя достоверности технического диагностирования принимает вид

$$D = (1 - \alpha_i - \beta_i)^m P_i^{n-m}. \quad (5)$$

Особенностью показателя достоверности диагностирования D , определяемого выражениями (4) и в частном случае – (5), является симметричная зависимость от вероятностей ошибок первого рода α_i и второго рода β_i при допусковом контроле диагностических параметров.

Это вполне оправдано тем, что на этапе технического диагностирования решается задача распознавания множества технических состояний объекта диагностирования и принципиальное значение имеет определение вида технического состояния объекта диагностирования

из числа неисправных (неработоспособных) состояний для последующего определения места отказа (неисправности). В таких условиях нежелательна любая ошибка в определении технического

состояния объекта диагностирования. В этом состоит отличие определения показателей достоверности контроля технического состояния и технического диагностирования.

При контроле технического состояния рассматриваются ошибки первого и второго рода при оценке технического состояния объекта контроля в целом, и доминирующее влияние на

показатель достоверности оказывают ошибки второго рода [9]. При техническом диагностировании рассматриваются ошибки первого и второго рода при оценке параметров объекта

диагностирования по результатам их допускового контроля, и показатель достоверности в одинаковой степени зависит от рассматриваемых ошибок первого и второго рода.

На рис. 2 изображены графики зависимостей показателя достоверности D от вероятности P_i работоспособного технического состояния объекта диагностирования по каждому диагностическому параметру, рассчитанные в соответствии с выражением (5) при общем числе диагностических параметров $n = 10$ и различных значениях вероятностей ошибок первого и второго рода α_i и β_i и числа контролируемых параметров m .

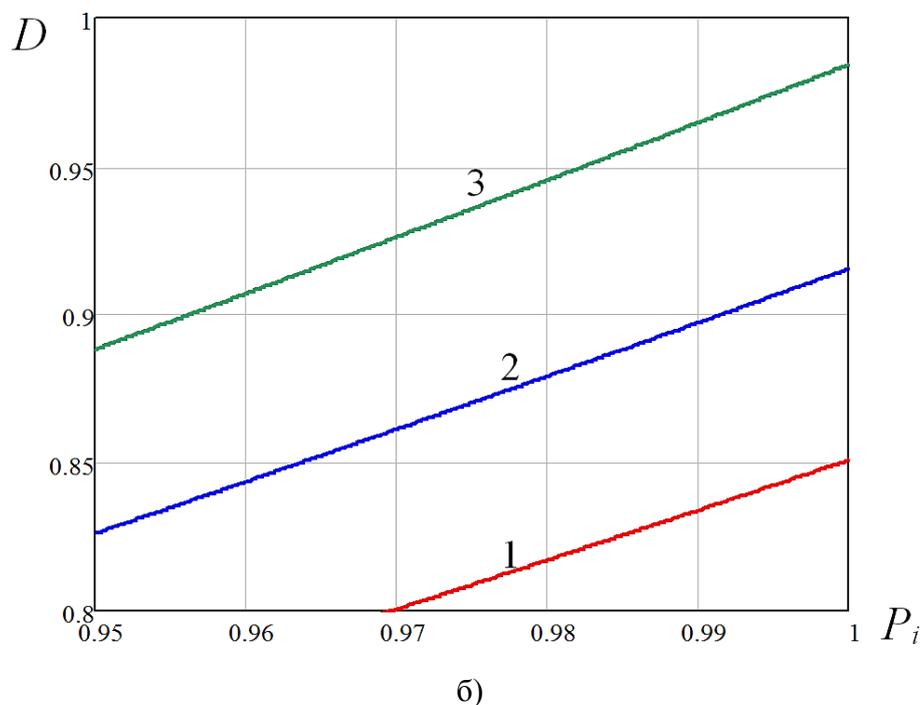
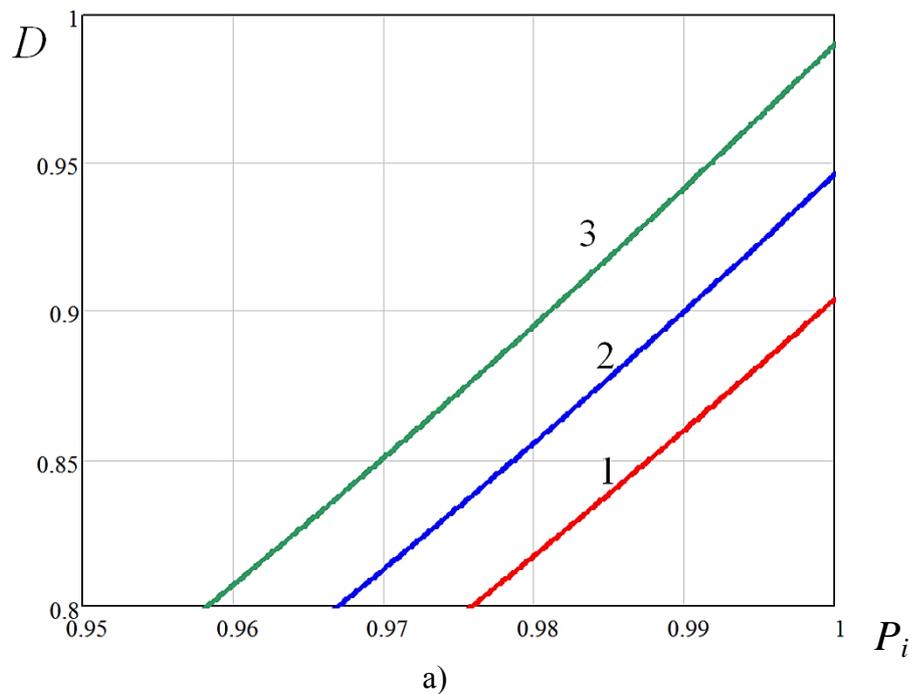


Рис. 2. Показатели достоверности технического диагностирования в зависимости от вероятностей работоспособного состояния объекта диагностирования и ошибок первого и второго рода по отдельным параметрам

Зависимости на рис. 2,а соответствуют $m = 5$. Зависимости на рис. 2,б соответствуют $m = 8$. Кривые 1 соответствуют $\alpha_i = 0,001$, $\beta_i = 0,001$; кривые 2 – $\alpha_i = 0,001$, $\beta_i = 0,01$; кривые 3 – $\alpha_i = 0,01$, $\beta_i = 0,01$. При симметричном характере влияния вероятностей ошибок первого рода α_i и второго рода β_i на величину показателя достоверности случай $\alpha_i = 0,001$, $\beta_i = 0,01$ также соответствует случаю $\alpha_i = 0,01$, $\beta_i = 0,001$.

Анализ приведенных зависимостей показывает, что показатель достоверности диагностирования D увеличивается с увеличением вероятностей P_i и с уменьшением вероятностей α_i и β_i . В диапазоне значений вероятностей P_i можно выделить области, в которых с увеличением числа контролируемых диагностических параметров m величина D увеличивается, и области, в которых с увеличением числа контролируемых диагностических параметров m величина D уменьшается. Уменьшение величины показателя достоверности диагностирования D с увеличением m имеет место при значениях вероятностей P_i , близких к единице. Это является иллюстрацией преобладающего влияния возможных инструментальных ошибок при оценке диагностических параметров по сравнению с методической составляющей технического диагностирования при уменьшении числа контролируемых диагностических параметров. При контроле всех диагностических параметров ($m = n$) показатель достоверности технического диагностирования D не зависит от вероятностей P_i и определяется выражением (3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренный в статье показатель достоверности технического диагностирования СТС соответствует апостериорной вероятности правильного определения вида технического состояния объекта диагностирования как ситуации его функционирования. Он объективно характеризует достоверность технического диагностирования СТС, предназначенных для непрерывного применения и поддержания в готовности к применению, таких как системы и комплексы космического назначения. Выполненное формализованное описание и результаты исследования отражают влияние на достоверность технического диагностирования СТС основных факторов, проявляющихся при описании множества технических состояний объекта диагностирования диагностическими моделями.

Определяющее влияние на показатель достоверности технического диагностирования оказывают начальные вероятности работоспособного технического состояния объекта диагностирования по каждому диагностическому параметру и в одинаковой степени – вероятности ложного отказа (вероятность ошибки первого рода) и необнаруживаемого отказа (вероятность ошибки второго рода) по каждому диагностическому параметру. При этом в случае формирования диагностического решения по результатам допускового контроля множества диагностических параметров и ненулевых значений вероятностей ошибок первого и второго рода и исправного состояния объекта диагностирования число контролируемых параметров может быть оптимизировано по критерию максимума показателя достоверности. Полученные результаты могут быть использованы при разработке систем технического диагностирования СТС.

Список используемых источников

1. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. – М. : Наука, 2006. – 408 с.
2. Обеспечение надежности сложных технических систем / А. Н. Дорохов [и др.]. – СПб. : Лань, 2017. – 352 с.

3. Микони С. В., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов – М. : РАН, 2018. – 314 с.
4. Полянский В. И. Нечеткие множества в моделях и методах диагностирования сложных технических систем. – М. : Полиграф-сервис, 2010. – 241 с.
5. Современная телеметрия в теории и на практике / А. В. Назаров [и др.]. – СПб. : Наука и техника, 2007. – 672 с.
6. Управление созданием и эксплуатацией радиолокационных систем дальнего обнаружения / С. Ф. Боев [и др.]. – М. : Научная книга, 2019. – 424 с.
7. Талалаев А. А., Фраленко В. П., Хачумов В. М. Обзор стандартов и концепция построения средств мониторинга, контроля и диагностики космического аппарата // Программные системы: теория и приложения. – 2015. – № 3. – С. 21–43.
8. Генев А. А., Русаков К. Д., Хиль С. Ш. Идентификация состояния сложной технической системы в условиях неопределенности измерительной информации // Программные продукты и системы. – 2017. – № 3. – С. 373–377.
9. Мальцев Г. Н., Якимов В. Л. Достоверность многоэтапного контроля технического состояния объектов испытаний // Информационно-управляющие системы. – № 1. – 2018. – С. 49–57.
10. Мальцев Г. Н., Склемин Д. В. Оптимизация требований к показателям достоверности при многоэтапном контроле технического состояния объекта испытаний по критерию минимальной стоимости испытаний // Вооружение и экономика. – 2023. – № 1. – С. 53–64.
11. Назаров А. В., Якимов В. Л. Алгоритм выбора диагностических признаков при поиске мест и причин неисправностей бортовых систем объектов ракетно-космической техники // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2013. – Вып. 641. – С. 56–60.
12. Сеньченков В. И., Абсалямов Д. Р. Формальное описание отказов и выбор минимального множества контролируемых признаков в технических системах // Авиакосмическое приборостроение. – 2011. – № 3. – С. 36–41.
13. Ахметханов Р. С., Дубинин Е. Ф., Куксова В. И. Некоторые аспекты оценки эффективности диагностических систем // Вестник научно-технического развития. – 2016. – № 4. – С. 3–18.
14. Серых В. И., Гребцова Л. В. Достоверность многопараметрического измерительного контроля // Вестник СибГУТИ. – 2010. – № 1. – С. 70–76.

С. С. Камчалов;
В. В. Карагодин,
доктор технических наук, профессор;
Д. В. Рыбаков,
кандидат технических наук;
И. В. Хомич

МОДЕЛИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

В статье рассматривается задача анализа эффективности процессов функционирования систем электроснабжения ракетно-космических комплексов. Для решения данной задачи обоснована необходимость рассмотрения системы электроснабжения и ее потребителей как единой целенаправленной системы, обеспечивающей выполнение ракетно-космическим комплексом задач по предназначению. Учитывая специфику функционирования ракетно-космических комплексов, для оценки результата процесса функционирования систем электроснабжения предложена вероятностная модель. Рассмотрено содержание и физический смысл каждой из компонент данной модели с учетом возможных вариантов законов их описания. Исходя из полученных результатов, предложены модели для исследования эффективности процессов функционирования систем электроснабжения.

Ключевые слова: ракетно-космический комплекс, система электроснабжения, работоспособность, модель, эффективность процесса функционирования.

ВВЕДЕНИЕ

Опыт проведения военных конфликтов последнего времени свидетельствует о расширении и усложнении круга задач, решаемых в космосе и из космоса. С учетом возрастающих требований к обеспечению безопасности государства в воздушно-космической сфере и к информационному обеспечению высших звеньев управления Вооруженных сил одной из основных задач развития вооружения космических войск, включая их наземные компоненты, является повышение их живучести и боевой устойчивости. Это, в свою очередь, обуславливает необходимость обеспечения жестких требований к бесперебойности и непрерывности электроснабжения потребителей ракетно-космических комплексов (РКК) в различных условиях оперативно-стратегической обстановки [1, 2].

Успешное решение указанных задач в значительной степени зависит от уровня работоспособности систем электроснабжения (СЭС) ракетно-космических комплексов. Для анализа их работоспособности и обоснованного принятия управленческих решений в процессе эксплуатации требуется разработка моделей, отражающих показатели качества их процессов функционирования. При этом электроснабжение РКК следует рассматривать как целенаправленный процесс, обеспечивающий выполнение задач по предназначению, а об его качестве надо судить по степени достижения этой цели.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Анализ эффективности процессов функционирования сложных технических систем, к которым относятся и СЭС, является необходимым условием при обосновании направлений их совершенствования и развития [3, 4]. Особую актуальность эта задача приобретает при введении в эксплуатацию нового технологического оборудования, предъявляющего повышенные требования к показателям качества электрической энергии, нарушение электроснабжения которого может привести к нарушению сложных технологических процессов. Важность

решения этих задач еще более возрастает в условиях проведения специальной военной операции, в ходе которой происходит значительное возрастание интенсивности применения объектов наземной космической инфраструктуры, включая СЭС РКК.

Учитывая возрастающую функциональную взаимосвязь СЭС с другими техническими и технологическими системами РКК, при анализе эффективности процессов функционирования СЭС систему электроснабжения и потребителей ракетно-космического комплекса необходимо рассматривать как единую систему [5, 6], так как конечной целью процесса функционирования системы «СЭС – потребители РКК» является выполнение РКК задач по предназначению.

К основным свойствам процесса функционирования СЭС РКК как целенаправленного процесса обеспечения потребителей электрической энергией в необходимом количестве и требуемого качества, в соответствии с теорией эффективности целенаправленных процессов [7], относятся: результативность, ресурсоемкость и оперативность.

Результативность характеризуется получаемым в результате процесса функционирования СЭС РКК целевым эффектом (т. е. результатом, ради которого она функционирует).

Ресурсоемкость характеризуется затратами всех видов ресурсов (материально-технических, энергетических, информационных, временных, финансовых, людских и т. п.), необходимых для обеспечения работоспособности СЭС и получения целевого эффекта РКК.

Оперативность определяется временными характеристиками, обусловленными необходимостью выполнения РКК задач по предназначению в установленные руководящими документами сроки. Важным аспектом, влияющим на оперативность решаемых РКК задач, являются возможные перерывы электроснабжения и, как следствие, нарушения графика технологического процесса функционирования РКК, т. е. время, необходимое для восстановления электроснабжения и возобновления выполнения задач по предназначению ракетно-космическим комплексом.

В совокупности указанные свойства порождают комплексное свойство процесса функционирования СЭС РКК, называемое эффективностью.

Под *эффективностью процесса функционирования системы электроснабжения ракетно-космического комплекса* будем понимать комплексное операционное свойство (качество) целенаправленного процесса функционирования СЭС РКК, характеризующее его приспособленность к достижению цели, реализуемой РКК (к выполнению стоящей перед РКК задачи по предназначению).

Для оценки показателей качества целенаправленного процесса обеспечения потребителей электрической энергией введем следующие показатели [8]:

для оценки результативности

$\mathbf{Y}_{n_1}^{(1)} = \mathbf{v}_{n_1} = \langle v_1, v_2, \dots, v_{n_1} \rangle$ – показатель (вектор) целевого эффекта от функционирования

ракетно-космического комплекса;

для оценки ресурсоемкости

$\mathbf{Y}_{n_2}^{(2)} = \mathbf{z}_{n_2} = \langle z_1, z_2, \dots, z_{n_2} \rangle$ – показатель (вектор) затрат ресурсов на получение целевого

эффекта;

для оценки оперативности

$\mathbf{Y}_{n_3}^{(3)} = \mathbf{\tau}_{n_3} = \langle \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{n_3} \rangle$ – показатель (вектор) затрат времени на получение целевого

эффекта.

Тогда комплексное свойство эффективности процесса функционирования СЭС РКК можно описать трехмерным вектором, содержащим три группы компонент – показателей качества процесса ее функционирования, в виде

$$\mathbf{Y}_3 = \langle \mathbf{Y}_{n_1}^{(1)}, \mathbf{Y}_{n_2}^{(2)}, \mathbf{Y}_{n_3}^{(3)} \rangle = \langle \mathbf{v}_{n_1}, \mathbf{z}_{n_2}, \mathbf{\tau}_{n_3} \rangle = \langle v_1, v_2, \dots, v_{n_1}, z_1, z_2, \dots, z_{n_2}, \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{n_3} \rangle.$$

В общем случае исследование эффективности процесса функционирования СЭС РКК предполагает, во-первых, определение характера зависимости между компонентами вектора

$$\hat{\mathbf{Y}}_3 = \langle \hat{\mathbf{v}}, \hat{\mathbf{z}}, \hat{\mathbf{t}} \rangle; \quad (1)$$

во-вторых, в связи с конкретным физическим смыслом компонент вектора $\hat{\mathbf{Y}}_3$ и на основании полученных зависимостей определение интегрального закона его распределения, который может быть представлен в следующей форме [7]:

$$F_{\hat{\mathbf{Y}}_3}(z, \tau, \nu) = P[(\hat{\mathbf{v}} > \nu) \cap (\hat{\mathbf{z}} \leq z) \cap (\hat{\mathbf{t}} \leq \tau)] = \int_{\nu}^{\infty} \int_{-\infty}^z \int_{-\infty}^{\tau} \varphi_{\hat{\mathbf{Y}}_3}(\hat{\mathbf{v}}, \hat{\mathbf{z}}, \hat{\mathbf{t}}) d\hat{\mathbf{v}} d\hat{\mathbf{z}} d\hat{\mathbf{t}}. \quad (2)$$

Специфика функционирования СЭС и потребителей РКК при выполнении ими задач по предназначению, их военная и государственная значимость требуют при анализе эффективности процессов функционирования СЭС РКК учитывать принципиальную особенность, которая заключается в следующем.

Показатель результативности процесса функционирования СЭС РКК должен отражать важность решаемых ракетно-космическим комплексом задач по предназначению. В связи с чем результатом его функционирования может быть только одно событие – выполнение поставленной задачи. Рассмотрение иных результатов функционирования РКК не имеет никакого смысла. В связи с этим утверждением максимальный эффект от функционирования СЭС РКК может быть достигнут только в одном случае, при котором, во-первых, поставленная РКК задача выполнена, во-вторых, затраты на ее выполнение и сроки ее выполнения соответствуют расчетным (установленным руководящими документами) значениям. Все остальные случаи, приводящие к увеличению затрат и/или времени на выполнение задачи РКК, будут приводить к снижению эффективности функционирования РКК, но не к срыву выполнения поставленной задачи. То есть цель функционирования РКК будет все равно достигнута, но с большими затратами и/или в неуставленные сроки.

Исходя из рассмотренной особенности, результат процесса функционирования системы электроснабжения РКК будет описываться двухкомпонентным вектором

$$\hat{\mathbf{Y}}_2 = \langle \hat{\mathbf{z}}, \hat{\mathbf{t}} \rangle \quad (3)$$

при условии, что результатом процесса функционирования СЭС является выполнение РКК поставленной задачи, т. е. $\mathbf{v} = \mathbf{v}_{\text{РКК}}$.

Тогда интегральный закон распределения может быть представлен в следующем виде:

$$F_{\hat{\mathbf{Y}}_2}(z, \tau) = P[(\hat{\mathbf{z}} \leq z) \cap (\hat{\mathbf{t}} \geq \tau)] = \int_{-\infty}^z \int_{\tau}^{\infty} \varphi_{\hat{\mathbf{Y}}_2}(\hat{\mathbf{z}}, \hat{\mathbf{t}}) d\hat{\mathbf{z}} d\hat{\mathbf{t}}. \quad (4)$$

Таким образом, для исследования эффективности процессов функционирования СЭС РКК необходимо рассмотреть содержание и физический смысл каждой из компонент данного вектора с учетом возможных вариантов законов их описания.

МОДЕЛЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ПРИ РАВНОМЕРНОМ ЗАКОНЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАТРАТ

При рассмотрении оперативности необходимо полагать, что виртуальная длительность $\hat{\mathbf{t}}$ выполнения задачи по предназначению ракетно-космическим комплексом складывается из двух независимых слагаемых – τ_p и $\hat{\mathbf{t}}_0$, т. е.

$$\hat{\mathbf{t}} = \tau_p + \hat{\mathbf{t}}_0, \quad (5)$$

где τ_p – расчетное (регламентированное) время выполнения задачи, установленное руководящими документами;
 $\hat{\tau}_o$ – случайное по характеру отклонение времени выполнения задачи от расчетного (регламентированного) времени τ_p .

В соответствии со спецификой функционирования РКК, когда выполнение задач по назначению осуществляется по строго регламентированному графику, $\hat{\tau}_o$ может характеризовать только задержку выполнения задачи ракетно-космическим комплексом ($\hat{\tau}_o > 0$).

Очевидно, что уменьшение времени задержки $\hat{\tau}_o$ может быть достигнуто за счет привлечения дополнительных ресурсов. Поскольку при этом расчетное время выполнения задачи τ_p не меняется, то отклонение времени выполнения задачи от расчетного значения можно представить в виде некоторой зависимости от затрат $\hat{\tau}_o = f(\hat{z})$.

При рассмотрении конкретных случаев можно полагать, что $\hat{\tau}_o$ изменяется обратно пропорционально привлекаемым ресурсам, т. е.

$$\hat{\tau}_o = \frac{\mu}{\hat{z}}, \quad (6)$$

где μ – параметр, характеризующий возможный расход привлекаемых ресурсов за единицу времени.

Будем считать, что затраты z на функционирование СЭС РКК относятся к одному виду ресурсов и изменяются в пределах от a до b , где значение a характеризует минимальные возможные затраты, b – максимально располагаемые затраты.

Тогда, если других сведений о затратах нет, можно считать их случайной величиной \hat{z} , распределенной равномерно на интервале (a, b) , при этом плотность ее распределения можно представить в виде [8]

$$f_{\hat{z}}(z) = \frac{\Pi(z; a, b)}{b - a} = \frac{1}{b - a}, \quad (7)$$

где $\Pi(z; a, b) = \Delta(z - a) - \Delta(z - b)$ – селектор интервала $(a, b) = \{z : a < z < b\}$;

$$\Delta(z - a) = \begin{cases} 0 & \text{при } z < a \\ 1 & \text{при } z > a \end{cases} \text{ – селектор луча } (a, \infty) = \{z : a < z < \infty\};$$

$$\Delta(z - b) = \begin{cases} 0 & \text{при } z < b \\ 1 & \text{при } z > b \end{cases} \text{ – селектор луча } (b, \infty) = \{z : b < z < \infty\}.$$

С учетом формул (5) и (6) длительность выполнения задачи $\hat{\tau}$ будет определяться выражением

$$\hat{\tau} = \tau_p + \frac{\mu}{\hat{z}} \quad (8)$$

при равномерном распределении на интервале $\left(\tau_p + \frac{\mu}{b}, \tau_p + \frac{\mu}{a}\right)$ с плотностью распределения

$$f_{\hat{\tau}(\hat{z})}(\tau, z) = \frac{1}{\mu} \frac{ab}{b - a}. \quad (9)$$

Тогда интегральный закон распределения вектора \hat{Y}_2 имеет вид

$$F_{\hat{Y}_2}(z, \tau) = \int_a^z \int_{\tau}^{\tau_p + \frac{\mu}{a}} f_{\hat{Y}_2}(\hat{z}, \hat{\tau}) d\hat{z} d\hat{\tau}. \quad (10)$$

С учетом равенств (7) и (9) плотность распределения вектора результатов процесса функционирования СЭС РКК будет иметь следующий вид:

$$f_{\hat{Y}_2}(z, \tau) = f_{\hat{z}}(z) f_{\hat{\tau}(\hat{z})}(\tau, z) = \frac{ab}{\mu(b-a)^2}. \quad (11)$$

Подставив выражение (11) в (10) и выполнив интегрирование, получим выражение

$$F_{\hat{Y}_2}(z, \tau) = \int_a^z \int_{\tau}^{\tau + \frac{\mu}{a}} \frac{ab}{\mu(b-a)^2} d\hat{z} d\hat{\tau} = (\hat{z} - a) \left(\tau_p + \frac{\mu}{a} - \hat{\tau} \right) \frac{ab}{\mu(b-a)^2}. \quad (12)$$

Выражение (12) описывает двухкомпонентную вероятностную модель результата процесса функционирования СЭС РКК при условии равномерного закона распределения затрат и при том, что результатом процесса функционирования СЭС является выполнение РКК поставленной задачи, т. е. $\nu = \nu_{\text{РКК}}$.

МОДЕЛЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ПРИ НЕРАВНОМЕРНОМ ЗАКОНЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАТРАТ

Для обеспечения процесса функционирования СЭС РКК, как было отмечено ранее, могут привлекаться различные виды ресурсов, затраты которых, как правило, имеют неравномерный характер, зависящий от множества факторов. При этом, как показывает опыт эксплуатации СЭС РКК, ситуация, при которой затраты будут находиться на минимально возможном уровне, является наиболее вероятной, чем ситуация, при которой они примут максимально возможное значение. Причем вероятность максимальных затрат обратно пропорциональна их величине. В связи с этим наиболее подходящим законом распределения затрат является закон бета-распределения, плотность вероятности которого в общем виде описывается следующим выражением:

$$f(x) = \frac{x^{\alpha-1}(1-x)^{\beta-1}}{B(\alpha, \beta)}, \quad x \in (0, 1), \quad (13)$$

где α, β – параметры бета-распределения, $\alpha > 0, \beta > 0$;
 $B(\alpha, \beta)$ – бета-функция.

Положим параметры бета-распределения равными $\alpha < 1, \beta = 1$. В этом случае $f(x)$ будет иметь вид (рис. 1), отражающий вероятностный характер изменения затрат в процессе функционирования СЭС РКК.

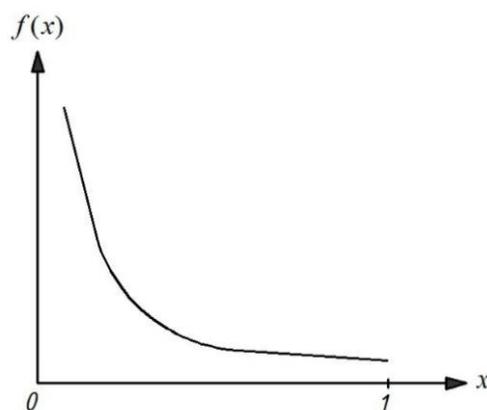


Рис. 1. Характер изменения плотности бета-распределения при $0 < \alpha < 1, \beta \geq 1$

Тогда плотность вероятности (13) можно записать в следующем виде:

$$f(x) = \frac{x^{\alpha-1}(1-x)^{1-1}}{B(\alpha,1)} = \frac{x^{\alpha-1}\Gamma(\alpha+1)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(1)} = \alpha x^{\alpha-1}, x \in (0,1]. \quad (14)$$

Произведем замену отрезка-носителя бета-распределения с $x \in (0,1]$ на $z \in (a,b]$, тогда получим

$$z = (b-a)x + a \Rightarrow x = \frac{z-a}{b-a}. \quad (15)$$

С учетом (15) выражение (14) примет следующий вид:

$$f(z) = \alpha \left(\frac{z-a}{b-a} \right)^{\alpha-1}, z \in (a,b]. \quad (16)$$

Из условия нормировки плотности распределения случайной величины

$$C \int_{-\infty}^{\infty} f(z) dz = 1 \quad (17)$$

найдем значение нормировочного множителя $C \in R^+$:

$$\frac{C\alpha}{(b-a)^{\alpha-1}} \int_a^b (z-a)^{\alpha-1} dz = \frac{C}{(b-a)^{\alpha-1}} [b-a]^{\alpha-1} - 0 = C(b-a).$$

Откуда

$$C = \frac{1}{b-a}. \quad (18)$$

Тогда плотность распределения случайной величины \hat{z} будет описываться выражением

$$f_{\hat{z}}(z) = \begin{cases} \frac{\alpha}{(b-a)^\alpha} (z-a)^{\alpha-1}, & z \in (a,b] \\ 0, & z \notin (a,b] \end{cases}. \quad (19)$$

С учетом (8) плотность распределения случайной величины $\hat{\tau}$ будет иметь вид [9]

$$f_{\hat{\tau}}(\tau) = f_{\hat{z}}(\psi(\tau)) |\psi'(\tau)|, \quad (20)$$

$$\psi(\tau) = \varphi^{-1}(\tau) = z = \frac{\mu}{\tau - \tau_p}, \quad \psi'(\tau) = -\frac{\mu}{(\tau - \tau_p)^2}.$$

Тогда

$$f_{\hat{\tau}}(\tau) = \begin{cases} \frac{\alpha}{(b-a)^\alpha} \left(\frac{\mu - a(\tau - \tau_p)}{\tau - \tau_p} \right)^{\alpha-1} \frac{\mu}{(\tau - \tau_p)^2}, & z \in \left[\tau_p + \frac{\mu}{b}, \tau_p + \frac{\mu}{a} \right) \\ 0, & z \notin \left[\tau_p + \frac{\mu}{b}, \tau_p + \frac{\mu}{a} \right) \end{cases}. \quad (21)$$

С учетом выражений (19) и (21) плотность распределения вектора результатов процесса функционирования СЭС РКК можно представить в виде

$$f_{\hat{Y}_2}(z, \tau) = f_{\hat{z}, \hat{\tau}}(z, \tau) = f_{\hat{z}}(z) f_{\hat{\tau}(z)}(\tau) = \frac{\alpha}{(b-a)^\alpha} (z-a)^{\alpha-1} \frac{\mu\alpha}{(b-a)^\alpha} \frac{(\mu - a(\tau - \tau_p))^{\alpha-1}}{(\tau - \tau_p)^{\alpha+1}}. \quad (22)$$

Подставив выражение (22) в (10) и выполнив интегрирование, получим

$$\begin{aligned}
F_{\hat{Y}_2}(z, \tau) &= \int_a^z \int_{\tau}^{\tau + \frac{\mu}{a}} \frac{\alpha}{(b-a)^\alpha} (\hat{z} - a)^{\alpha-1} \frac{\mu\alpha}{(b-a)^\alpha} \frac{(\mu - a(\tau - \tau_p))^{\alpha-1}}{(\tau - \tau_p)^{\alpha+1}} d\hat{z} d\hat{\tau} = \\
&= \frac{\mu\alpha}{(b-a)^{2\alpha}} (\hat{z} - a)^\alpha \left| z \int_{\tau}^{\tau + \frac{\mu}{a}} \frac{a^{\alpha-1} \left(\frac{\mu}{a} - (\tau - \tau_p) \right)^{\alpha-1}}{(\tau - \tau_p)^{\alpha+1}} d\hat{\tau} \right| = \frac{\mu\alpha a^{\alpha-1} (\hat{z} - a)^\alpha}{(b-a)^{2\alpha}} \int_{\hat{\tau} - \tau_p}^{\frac{\mu}{a}} \frac{\left(\frac{\mu}{a} - t \right)^{\alpha-1}}{t^{\alpha+1}} dt = \\
&= \frac{\mu^\alpha \alpha (\hat{z} - a)^\alpha}{(b-a)^{2\alpha}} \int_{\frac{a}{\mu}(\hat{\tau} - \tau_p)}^{\frac{\mu}{a}} t^{-1-\alpha} \left(1 - \frac{a}{\mu} t \right)^{\alpha-1} dt = \left| \begin{array}{l} s = \frac{a}{\mu} t \\ dt = \frac{\mu}{a} ds \end{array} \right| = \frac{\alpha \mu^{\alpha+1} (\hat{z} - a)^\alpha a^{\alpha+1}}{a (b-a)^{2\alpha} \mu^{1+\alpha}} \int_{\frac{a}{\mu}(\hat{\tau} - \tau_p)}^1 s^{-1-\alpha} (1-s)^{\alpha-1} ds = \\
&= \frac{\alpha a^\alpha (\hat{z} - a)^\alpha}{(b-a)^{2\alpha}} \int_{\frac{a}{\mu}(\hat{\tau} - \tau_p)}^1 \frac{\partial}{\partial s} \left(-\frac{1}{\alpha} (1-s)^\alpha s^{-\alpha} \right) ds = -\frac{a^\alpha (\hat{z} - a)^\alpha}{(b-a)^{2\alpha}} \left[s^{-\alpha} (1-s)^\alpha \right] \Big|_{\frac{a}{\mu}(\hat{\tau} - \tau_p)}^1 = \\
&= \frac{a^\alpha (\hat{z} - a)^\alpha}{(b-a)^{2\alpha}} \frac{a^{-\alpha} \mu^\alpha}{(\hat{\tau} - \tau_p)^\alpha} \left(1 - \frac{a}{\mu} (\hat{\tau} - \tau_p) \right)^\alpha = \frac{(\hat{z} - a)^\alpha}{(b-a)^{2\alpha}} \frac{(\mu - a(\hat{\tau} - \tau_p))^\alpha}{(\hat{\tau} - \tau_p)^\alpha}.
\end{aligned}$$

Таким образом, интегральный закон распределения вектора \hat{Y}_2 будет иметь следующий вид:

$$F_{\hat{Y}_2}(z, \tau) = \frac{(\hat{z} - a)^\alpha (\mu - a(\hat{\tau} - \tau_p))^\alpha}{(b-a)^{2\alpha} (\hat{\tau} - \tau_p)^\alpha}.$$

Данное выражение описывает двухкомпонентную вероятностную модель результата процесса функционирования СЭС РКК при условии выполнения РКК поставленной задачи ($\nu = \nu_{\text{РКК}}$) и с учетом неравномерного распределения затрат.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны модели для анализа результатов процесса функционирования СЭС РКК, учитывающие возможные законы распределения затрат, при условии, что результатом процесса функционирования СЭС является выполнение РКК поставленной задачи. Особенностью данных моделей, по сравнению с разработанными ранее [7, 8], является применение нового идеологического подхода к их построению. В случае обеспечения потребителей электрической энергией в необходимом количестве и требуемого качества, априори считается, что СЭС работает с максимальной эффективностью, которая позволяет РКК решать задачи по предназначению в установленные сроки с минимально возможными затратами.

Отклонение показателей СЭС в процессе ее функционирования может приводить к увеличению затрат на выполнение задач по предназначению РКК в установленные сроки или, что еще хуже, к срыву установленных сроков. В этом случае именно разработанные модели и позволяют оценить снижение эффективности функционирования системы «СЭС – потребитель РКК» и обоснованно принимать управленческие решения в процессе ее эксплуатации.

Список используемых источников

1. Пешехонов Н. Е., Рыбаков В. В., Рыбаков Д. В. Системы электроснабжения специальных объектов : учеб. пособие. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2019. – 173 с.

2. Папков Б. В., Илюшин П. В., Куликов А. Л. Надежность и эффективность современного электроснабжения : моногр. – Н. Новгород : Научно-издательский центр «XXI век», 2021. – 160 с.

3. Карагодин В. В., Рыбаков Д. В., Рыжый Н. В. Обоснование направлений совершенствования систем электроснабжения наземных комплексов с учетом обеспечения информационной безопасности // Электропитание : научно-техн. журн. – 2020. – Вып. 1. – С. 32–40.

4. Карагодин В. В., Рыбаков Д. В., Рыбаков В. В. Направления развития систем электроснабжения специальных объектов в условиях реализации инновационного сценария развития электроэнергетики // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – Вып. 3. – С. 168–173.

5. Папков Б. В., Куликов А. Л. Теория систем и системный анализ для энергетиков : учебник и практикум для вузов. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Юрайт, 2022. – 470 с.

6. Карагодин В. В., Рыбаков Д. В., Камчалов С. С. Системный подход к обоснованию направлений совершенствования систем электроснабжения специальных объектов Космических войск // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2023. – Вып. 689. – С. 202–207.

7. Петухов Г. Б., Якунин В. И. Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремленных систем. – М. : АСТ, 2006. – 504 с.

8. Петухов Г. Б. Теоретические основы и методы исследования эффективности оперативных целенаправленных процессов : учеб. пособие. – МО СССР, 1979. – 176 с.

9. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. – М. : Гос. изд-во физико-мат. литературы, 1958. – 464 с.

В. В. Карагодин,
доктор технических наук, профессор;
И. В. Хомич

ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МЕТОДОВ НАСТРОЙКИ ПАРАМЕТРОВ ПИД-РЕГУЛЯТОРА ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА СИСТЕМЫ АВТОНОМНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ КОМПЛЕКСОВ КОСМИЧЕСКИХ ВОЙСК

Проведен анализ существующих и реализованных в промышленности методов настройки ПИД-регуляторов, выявлены недостатки, присущие данным методам. На основании модели системы электроснабжения в программном пакете *MATLAB Simulink* проведено сравнение результатов, полученных при использовании различных методов настройки.

Обоснована необходимость применения принципов адаптивного управления при настройке параметров ПИД-регулятора возбуждения синхронного генератора.

Ключевые слова: синхронный генератор, ПИД-регулятор, настройка параметров регулятора, переходные процессы.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время происходит все более активное внедрение на наземных комплексах космических войск технического и технологического оборудования на базе электронной и микропроцессорной техники, реализуется повсеместная автоматизация технологических процессов. Все это приводит к повышению требований потребителей этих комплексов к показателям качества электрической энергии. Необеспечение требуемого качества электрической энергии может привести к выходу из строя оборудования, прерыванию технологических процессов и возникновению аварийных ситуаций. Для комплексов космических войск это равносильно невыполнению ими задач по предназначению.

Для обеспечения требуемых показателей качества электрической энергии в системах электроснабжения существуют несколько подходов, которые условно можно разделить на две группы: введение дополнительных функциональных элементов, позволяющих повысить качество электроэнергии, и совершенствование систем управления источниками электрической энергии комплексов, в качестве которых, как правило, применяются дизель-генераторные агрегаты.

До недавнего времени наиболее распространенным способом повышения показателей качества электрической энергии было введение дополнительных функциональных элементов (фильтры, стабилизаторы напряжения, преобразователи напряжения). Это связано с тем, что возможности построения и применения законов управления источником электрической энергии были сильно ограничены ввиду того, что система управления долгое время выполнялась на базе аналоговых элементов и проектировалась совместно с самим источником. Поэтому с течением времени в результате изменения количественного и качественного состава потребителей данные системы управления перестали обеспечивать должное качество электроэнергии для принципиально новых в техническом отношении потребителей.

На данный момент происходит повсеместное внедрение систем управления на базе промышленных контроллеров. Их применение позволяет использовать принципиально новые законы управления, которые раньше нельзя было реализовать с помощью аналоговой техники, а также изменять настройки параметров регулятора в ходе эксплуатации, тем самым изменяя динамику происходящих в системе процессов. В связи с этим большой интерес пред-

ставляет направление разработки новых законов управления и их реализация в цифровых системах автоматического регулирования возбуждения синхронных генераторов, которые позволили бы обеспечить требуемое качество электрической энергии.

МЕТОДЫ НАСТРОЙКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПИД-РЕГУЛЯТОРОВ

В качестве наиболее распространенного типа закона управления, реализуемого в промышленных контроллерах, является ПИД-закон регулирования. ПИД-регулятор формирует управляющее воздействие как сумму трех составляющих, пропорциональных отклонению, интегралу и скорости изменения управляемой величины (рис. 1).

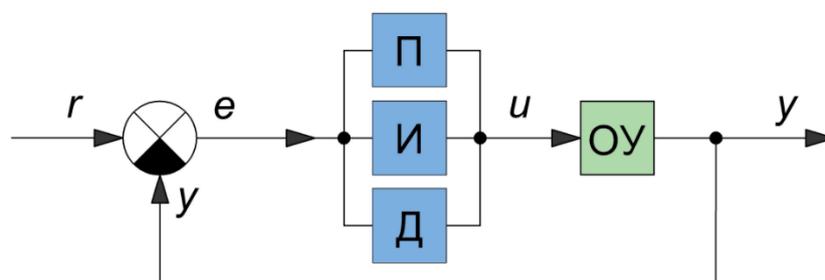


Рис. 1. Структурная схема ПИД-регулятора, где П – пропорциональный канал регулирования, И – интегральный канал регулирования, Д – дифференциальный канал регулирования, ОУ – объект управления, r – задающее воздействие, y – выход системы, u – управляющее воздействие, e – ошибка регулирования

По мнению специалистов, более 90% регуляторов различных промышленных объектов, находящихся в настоящее время в эксплуатации, используют ПИД-алгоритм в том или ином виде [1]. Такая популярность связана с тем, что сам по себе ПИД-регулятор – это простое устройство, которое легко реализуется и на аналоговых элементах, и на цифровых устройствах. При этом общий подход к настройке параметров ПИД-регулятора универсален для широкого спектра технологических процессов, различных по своей физической природе.

Однако, несмотря на то, что изобретение ПИД-регулятора относится к 1910 году [2], а первый метод настройки параметров ПИД-регулятора, изобретенный Циглером и Николсом, появился еще в 1942 году, остается достаточно большое количество нерешенных проблем. Во-первых, после расчета параметров регулятора, как правило, требуется его ручная подстройка для улучшения качества регулирования. Во-вторых, некоторые проблемы связаны с практической реализацией таких регуляторов, так, при настройке параметров регулятора требуется учет особенностей, которые вытекают из реальных условий их применения. К таким особенностям относятся: возможность возникновения «интегрального насыщения», погрешности дифференцирования, отсутствие достаточных знаний о динамике регулируемого процесса и др. Часто проблемы могут возникнуть и вследствие сложности эксплуатации самих регуляторов. Так, во многих ПИД-регуляторах прибегают к отключению дифференциальной составляющей из-за сложности ее настройки [3, 4]. Поэтому начиная с 80-х годов в отечественной и зарубежной промышленности стали разрабатывать методы автоматической настройки (промышленные контроллеры фирм *Foxboro*, *ABB*, *Emerson*, *Honeywell* и др.), позволяющей одновременно добиться повышения качества переходных процессов и, насколько это возможно, снизить влияние человека на настройку параметров регулятора, тем самым упростив условия эксплуатации таких регуляторов.

Введение автоматической настройки представляет собой осуществление двух важных этапов, каждый из которых является сложной самостоятельной задачей: идентификацией объекта управления, выбором/расчетом параметров регулятора.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Большинство применяемых в промышленности регуляторов используют для идентификации системы различные пробные воздействия (режим автоколебаний, единичный скачок, двойной импульс и т. д.) на основании отклика объекта управления, на которые определяются параметры модели.

Самой распространенной моделью, используемой при синтезе ПИД-регуляторов, является система 1-го порядка с запаздыванием, передаточная функция которой имеет вид

$$W(p) = \frac{k}{Tp + 1} e^{-Lp}, \quad (1)$$

где k – коэффициент усиления;
 T – постоянная времени;
 L – величина задержки.

В указанном случае параметры k , T , L , должны быть определены в процессе параметрической идентификации.

Идентификация производится до ввода объекта управления в эксплуатацию или непосредственно перед введением, при этом влияние возмущающих воздействий не учитывается. Данная схема идентификации хорошо зарекомендовала себя для стационарных объектов, работающих в режимах, близких к номинальным, в силу своей простоты и возможности применения готовых формул для определения параметров модели [3]. Однако для систем с переменной структурой и параметрами, к которым относится синхронный генератор в совокупности с потребителями электрической энергии (рис. 2), такой подход недопустим. В ходе эксплуатации изменяется и количественный состав (потребляемая мощность, коэффициент мощности) и качественный состав потребителей (статическая, двигательная, нелинейная нагрузка, аварийные режимы). Такой подход не применим и для сильно нелинейных систем или систем, динамические свойства которых существенно отличаются от динамических свойств модели.

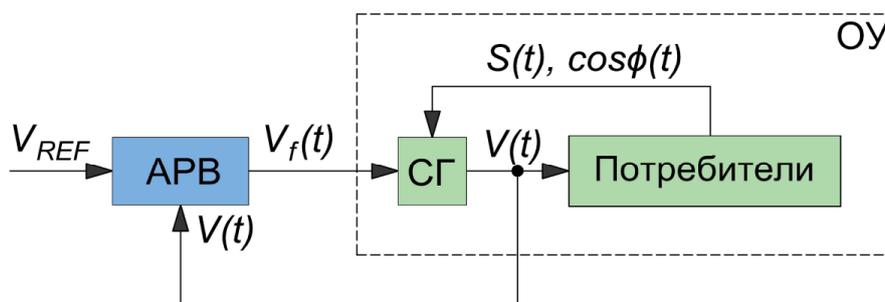


Рис. 2. Структурная схема системы управления возбуждением СГ, где АВВ – автоматический регулятор возбуждения, V_{REF} – уставка по напряжению,

$V_f(t)$ – напряжение возбуждения, $V(t)$ – напряжение генератора, $S(t)$ – полная мощность, $\cos\phi(t)$ – коэффициент мощности

Другой подход к идентификации объекта управления был предложен в работе [5]. Вместо модели 1-го порядка с транспортной задержкой используется непараметрическая модель, ос-

нованная на вычислении отклика линейной системы на произвольное воздействие как значения интеграла Дюамеля

$$y(t) = \int_0^t \frac{du}{d\tau} h(t - \tau) d\tau, \quad (2)$$

где $h(t)$ – реакция системы на входное воздействие в виде функции Хевисайда $1(t)$;
 $u(t)$ – управляющее воздействие;
 $y(t)$ – выходная величина объекта управления.

Отказ от параметрической модели позволяет идентифицировать динамику объекта управления без наложения ограничений на его структуру, что существенно повышает точность и адекватность модели. Кроме того, такая непараметрическая модель допускает наличие безынерционных нелинейностей в системе (системы Винера, Гаммерштейна), что существенно повышает диапазон подходящих объектов управления [6].

Еще одним преимуществом непараметрической модели является относительно низкая «стоимость» вычислений отклика системы на ЭВМ, что позволяет существенно ускорить процесс расчета параметров регулятора.

Однако данная модель по-прежнему не позволяет учесть структурно-параметрические изменения в объекте управления, а также динамические нелинейности. Как уже говорилось выше, объект управления «синхронный генератор – потребители» относится к системам с переменными структурой и параметрами.

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛЯТОРА

В зависимости от выбранного подхода к идентификации можно выделить три направления по расчету параметров ПИД-регулятора:

1. Расчет параметров ПИД-регулятора по аналитическим формулам.
2. Оптимизация параметров ПИД-регулятора.
3. Табличное управление.

Как уже было сказано выше, расчет по аналитическим формулам производится, если была произведена параметрическая идентификация системы, при этом в качестве модели объекта управления принята система 1-го или 2-го порядка. Это связано с невозможностью аналитического решения систем уравнений, которое необходимо при использовании моделей более высокого порядка. Формулы обычно получают в результате проводимого анализа в частотной и временной областях для замкнутой системы управления, используя методы размещения полюсов и другие алгебраические методы.

При использовании параметрических моделей более высокого порядка или непараметрических моделей системы применение аналитических методов становится невозможным. Поэтому для расчета параметров приходится обращаться к аппарату методов оптимизации. С помощью выбранного численного метода производится оптимизация выбранной целевой функции, которая обычно представляет собой интегральный или комплексный показатель качества системы управления [7]. Методы настройки, основанные на оптимизации, позволяют получить квазиоптимальные параметры регулятора для модели объекта любой сложности и при этом значительно снижают влияние человека на настройку (рис. 3). Однако данному методу присущи и значительные недостатки, среди которых – отсутствие гарантии результата (так как итерационный процесс по оптимизации целевой функции может разойтись либо сходиться слишком медленно); противоречивость различных показателей качества, что приводит к неоднозначности выбора целевой функции (повышение быстродействия может привести к снижению запаса устойчивости и наоборот); необходимость исследования целевой функции как поверхности в пространстве параметров ПИД-регулятора с целью исследования

ее свойств и выбора подходящего метода оптимизации (целевая функция может быть недифференцируемой, тогда применение градиентных методов не приведет к результату).

Развитие стохастических методов оптимизации [8–10] позволяет частично преодолеть проблемы, связанные со свойствами целевой функции и гарантией результата, однако решение задачи грамотного выбора целевой функции до сих пор остается актуальным.

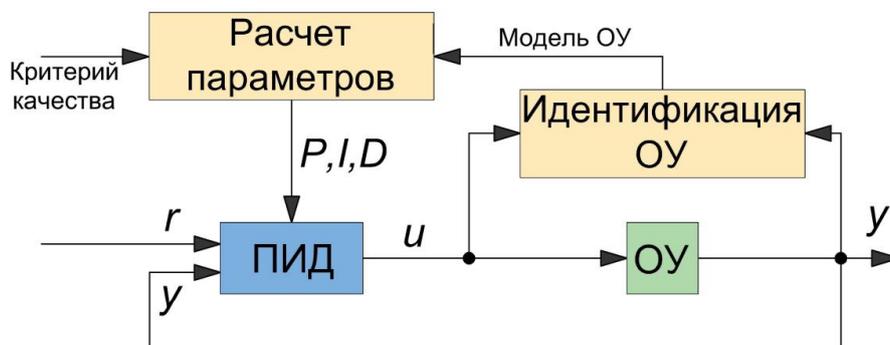


Рис. 3. Структура системы управления с идентификацией объекта управления и автоматической настройкой параметров ПИД-регулятора

Табличное управление представляет собой подход к управлению нелинейными системами с помощью семейства линейных регуляторов, каждый из которых обеспечивает удовлетворительное качество управления в заданных рабочих точках системы [11]. Количество рабочих точек и идентификация системы в них производится на стадии проектирования. Настройка параметров регулятора в основном производится с помощью ручной настройки, основанной на правилах теории автоматического управления и предыдущем опыте эксплуатации. В зависимости от величин заданных контролируемых переменных выбираются те или иные параметры регулятора (рис. 4).

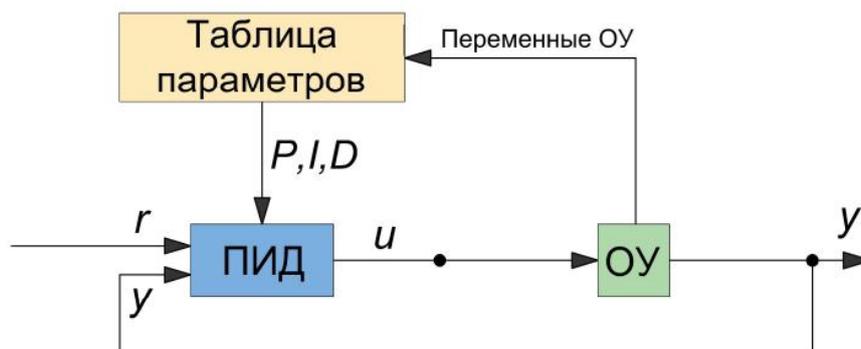


Рис. 4. Структура системы управления с табличной настройкой параметров ПИД-регулятора

Сейчас методика выбора конкретных параметров разрабатывается либо с применением аппарата нечетких множеств, либо с использованием классификатора на основе нейронной сети (рис. 5).

Табличный метод позволяет преодолеть трудности, связанные с управлением объектами с переменными структурой и параметрами, за счет введения набора параметров регулятора, однако из-за отсутствия точных и адекватных математических моделей таких объектов настройка параметров производится на основе метода экспертной оценки. Это существенно снижает эксплуатационную технологичность таких регуляторов, так как для своей подстройки или перенастройки они требуют высококвалифицированного персонала. В большинстве

случаев эксплуатирующие организации вынуждены обращаться к заводу-изготовителю при возникновении такой необходимости.

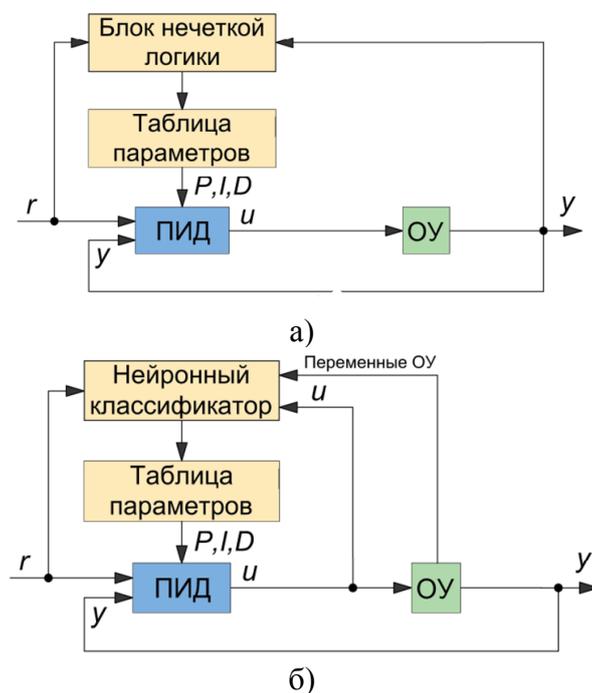


Рис. 5. Структура системы управления с табличной настройкой параметров ПИД-регулятора, реализованной на основе:
а – нечеткой логики; б – нейронной сети

Таким образом, проведенный анализ показывает, что ни один из описанных методов не способен в полной мере решить задачу синтеза ПИД-регулятора возбуждения синхронного генератора, который вместе с потребителем представляет собой систему с переменными структурой и параметрами, в условиях качественного и количественного изменения состава потребителей без привлечения дополнительных ресурсов в виде времени, затрачиваемого на настройку параметров человеком.

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ НАСТРОЙКИ ПИД-РЕГУЛЯТОРА ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Для сравнения методов настройки было произведено имитационное моделирование при помощи программного пакета *MATLAB Simulink* с использованием модели системы автономного электроснабжения [13], состоящей из синхронного генератора и нагрузки, которая включает асинхронные двигатели и активно-индуктивную нагрузку, соединенные параллельно (рис. 6).

В качестве исследуемого генератора был принят синхронный генератор со статической системой возбуждения МС1250-1000 со следующими параметрами [12]:

$$S_{\text{ном}} = 1250 \text{ кВА}; P_{\text{ном}} = 1000 \text{ кВт}; \omega = 1000 \text{ об/мин}; U_{\text{ном}} = 400 \text{ В};$$

$$x_d = 1/1153 \text{ о. е.}; x_d' = 0,648 \text{ о. е.}; x_d'' = 0,193 \text{ о. е.}; x_q = 0,119 \text{ о. е.}; x_q'' = 0,151 \text{ о. е.};$$

$$T_{d0} = 2,25 \text{ с}; T_d' = 0,376 \text{ с}; T_d'' = 0,01 \text{ с}.$$

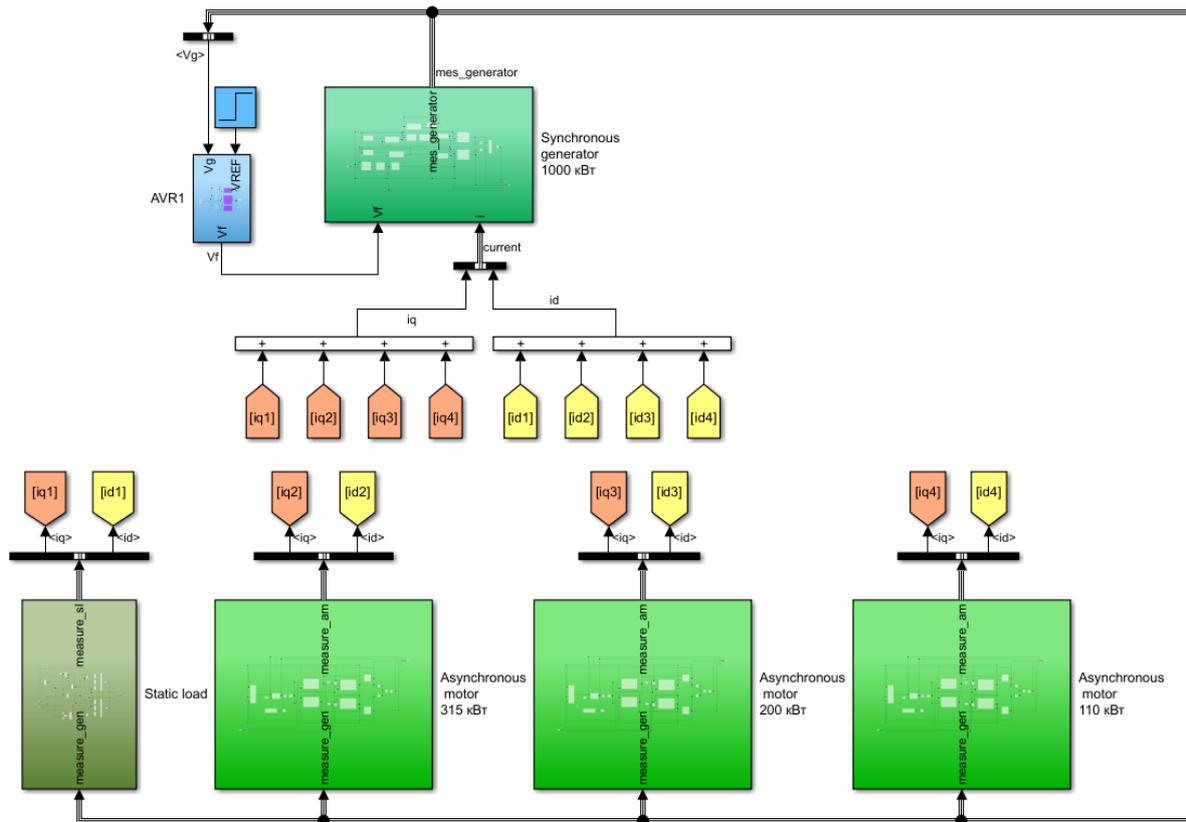


Рис. 6. Модель системы автономного электроснабжения в MATLAB Simulink

Наиболее интересно исследование качества работы системы автоматического регулирования возбуждения в предельно допустимых переходных режимах работы системы электроснабжения. Выбранные для исследования режимы представлены в табл. 1.

Таблица 1

Исследуемые режимы работы синхронного генератора

№ п/п	Описание режима
1	Возбуждение синхронного генератора
2	Наброс 700 кВА активно-индуктивной нагрузки при $\cos\varphi = 0,8$ с последующим пуском асинхронного двигателя мощностью 4A355M2Y3 315 кВт
3	Наброс 800 кВА активно-индуктивной нагрузки при $\cos\varphi = 0,8$ с последующим пуском асинхронного двигателя мощностью 4A315M2Y3 200 кВт
4	Наброс 600 кВА активно-индуктивной нагрузки при $\cos\varphi = 0,8$ с последующим пуском двух асинхронных двигателей мощностью 4A315M2Y3 200 кВт
5	Наброс 800 кВА активно-индуктивной нагрузки при $\cos\varphi = 0,8$ с последующим пуском двух асинхронных двигателей мощностью 4A280S2Y3 110 кВт

Была проведена настройка параметров ПИД-регулятора возбуждения синхронного генератора с использованием трех вышеописанных методов: настройки по методу Циглера – Николса с последующей ручной подстройкой, автоматической настройки параметров с идентификацией объекта с помощью тестового сигнала в виде ступенчатого воздействия (функции Хевисайда), ручной настройки параметров регулятора для нескольких режимов (табличное управление). Результаты моделирования исследуемых режимов работы рассмотренной системы автономного электроснабжения представлены на рис. 7–11.

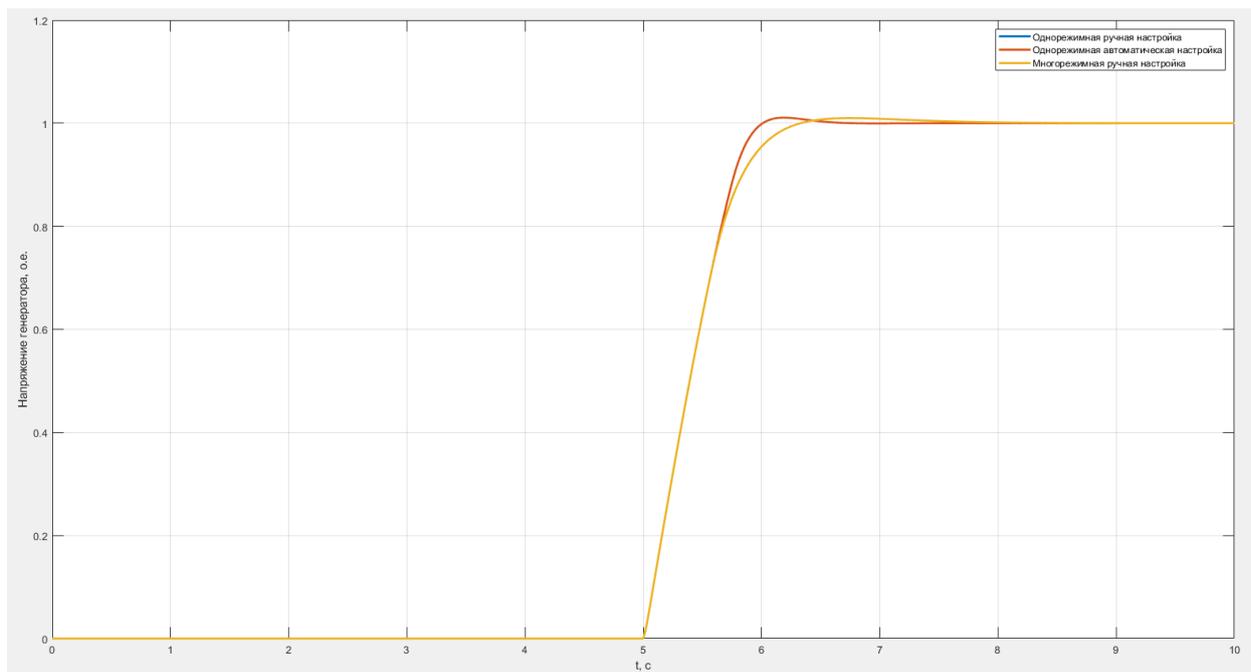


Рис. 7. Результаты моделирования режима возбуждения синхронного генератора с ПИД-регулятором возбуждения, параметры которого настроены различными методами

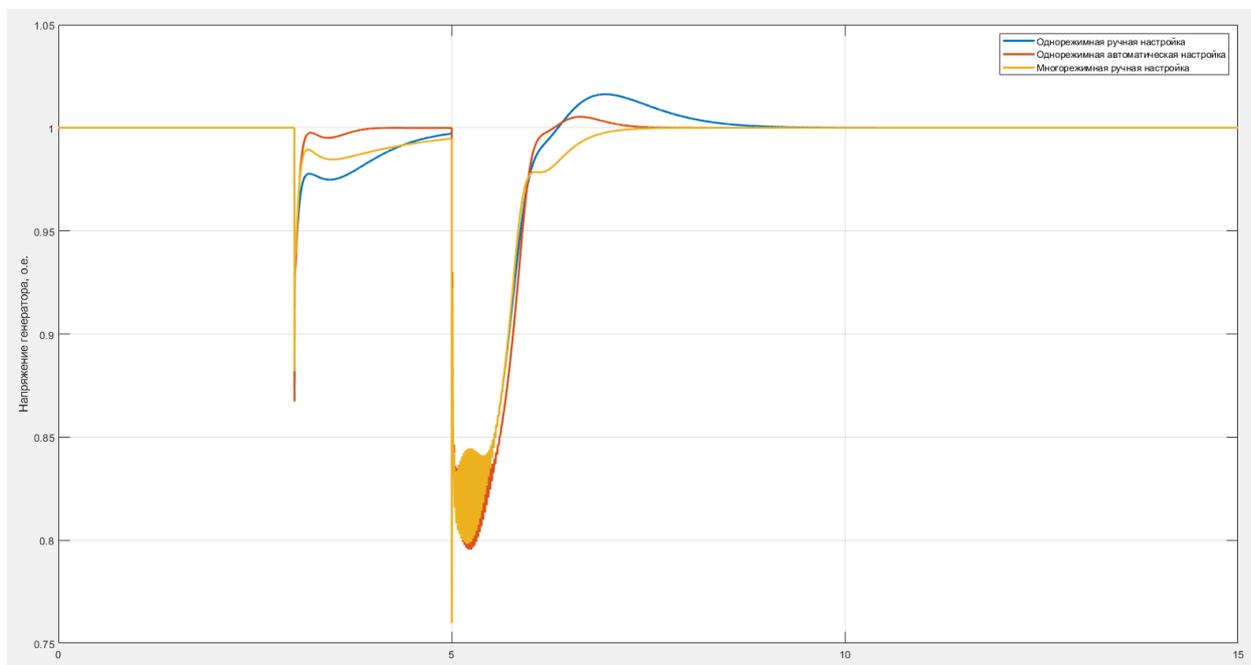


Рис. 8. Результаты моделирования режима наброса 700 кВА активно-индуктивной нагрузки при $\cos\varphi = 0,8$ с последующим пуском асинхронного двигателя мощностью 315 кВт на синхронный генератор с ПИД-регулятором возбуждения, параметры которого настроены различными методами

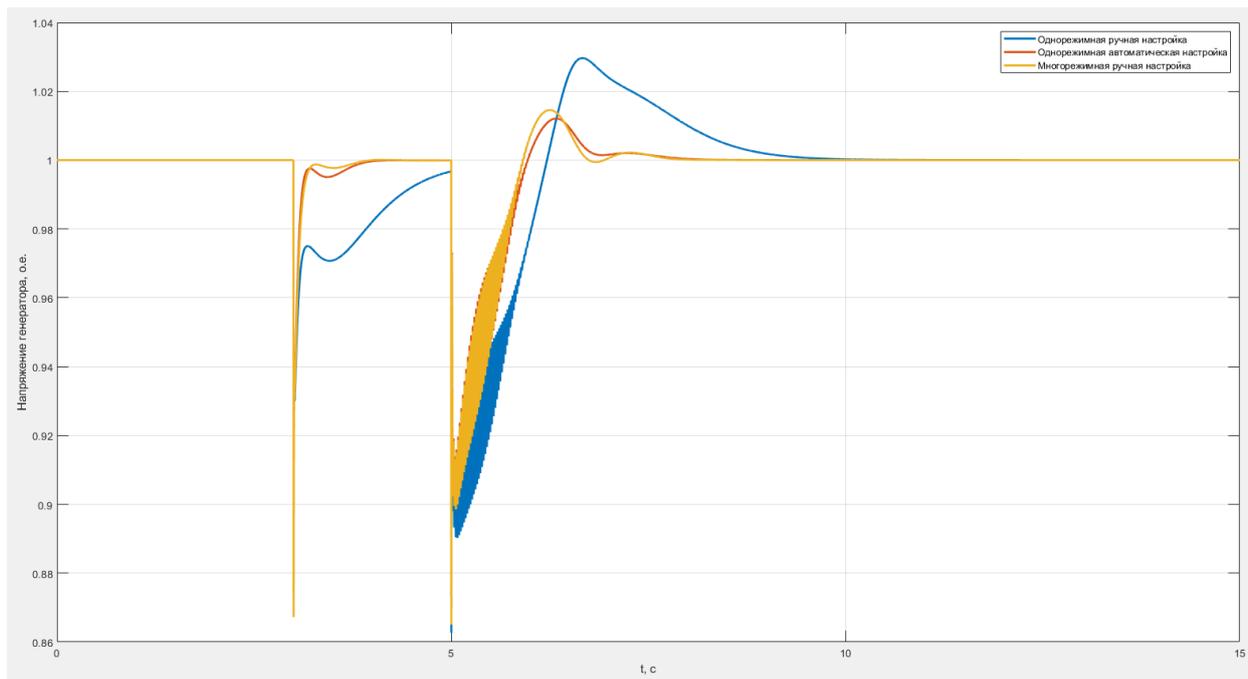


Рис. 9. Результаты моделирования режима наброса 800 кВА активно-индуктивной нагрузки при $\cos\varphi = 0,8$ с последующим пуском асинхронного двигателя мощностью 200 кВт на синхронный генератор с ПИД-регулятором возбуждения, параметры которого настроены различными методами

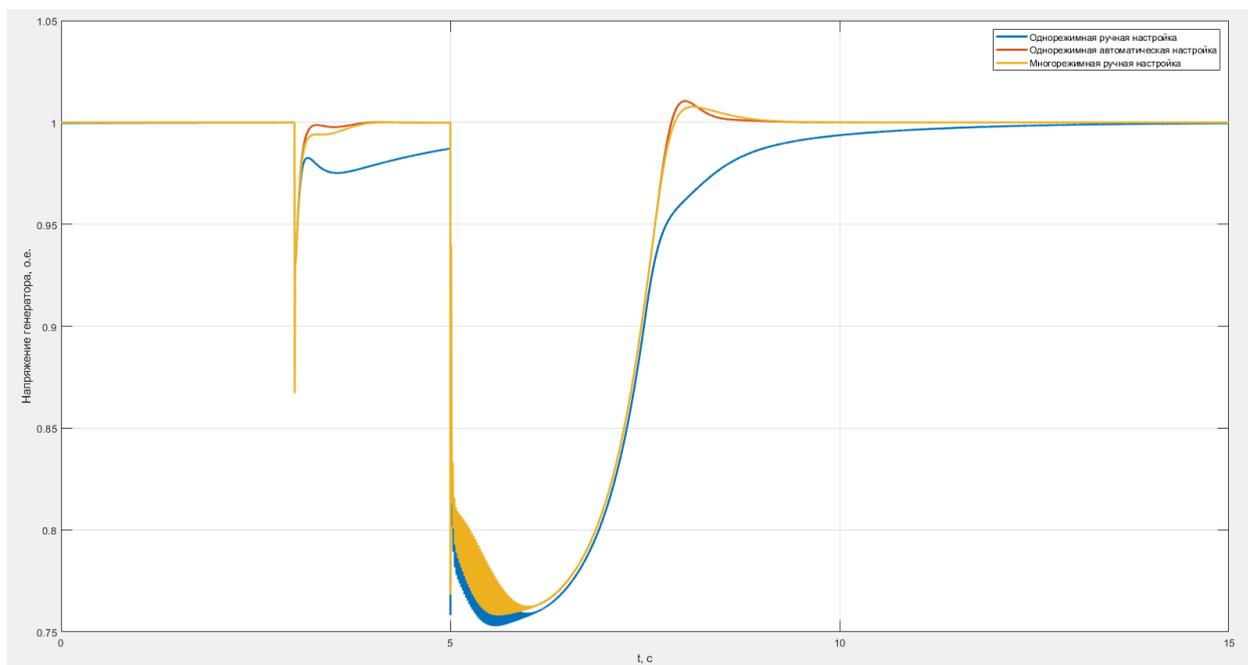


Рис. 10. Результаты моделирования режима наброса 600 кВА активно-индуктивной нагрузки при $\cos\varphi = 0,8$ с последующим пуском двух асинхронных двигателей мощностью 200 кВт на синхронный генератор с ПИД-регулятором возбуждения, параметры которого настроены различными методами

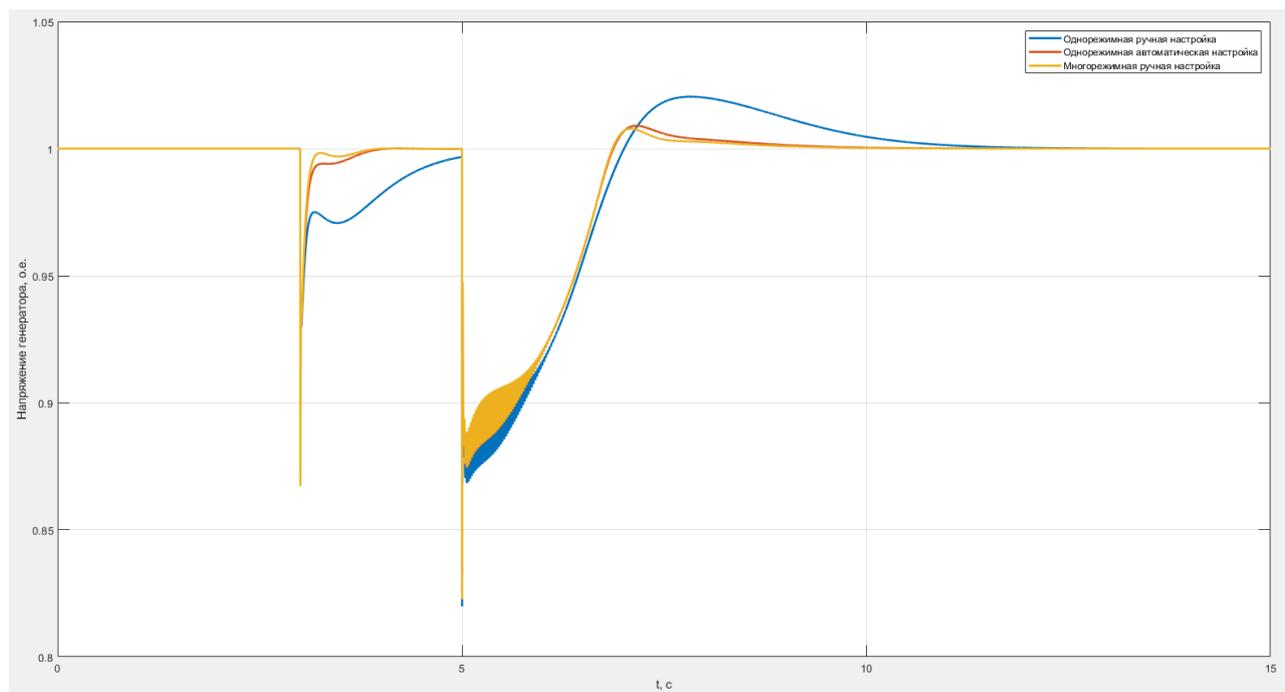


Рис. 11. Результаты моделирования режима наброса 700 кВА активно-индуктивной нагрузки при $\cos\varphi = 0,8$ с последующим пуском трех асинхронных двигателей мощностью 110 кВт на синхронный генератор с ПИД-регулятором возбуждения, параметры которого настроены различными методами

В качестве единичных показателей качества переходного процесса в системе электро-снабжения были приняты следующие показатели:

$\Delta U\%$ – величина провала напряжения;

Δt – длительность переходного процесса;

h – перерегулирование.

Кроме того, был введен интегральный показатель качества переходного процесса, заданный выражением

$$ITAE = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt,$$

где t – время;

$e(t)$ – ошибка регулирования.

Значения данных показателей для исследуемых режимов сведены в табл. 2.

Результаты моделирования свидетельствуют, что наилучшими показателями качества переходного процесса в системе электроснабжения при использовании большинства режимов обладает метод табличного регулирования.

Однако, как уже было сказано выше, регуляторы возбуждения с табличным методом управления имеют низкую эксплуатационную технологичность и требуют значительных материальных и временных затрат на этапе настройки, связанных с необходимостью проведения многократных испытаний объекта управления в различных режимах работы. При этом хорошие результаты показывает регулятор с автоматической настройкой.

Таблица 2

Показатели качества переходного процесса в различных режимах работы синхронного генератора с ПИД-регулятором возбуждения

Номер режима	Ручная однорежимная настройка	Автоматическая однорежимная настройка	Ручная многорежимная настройка (табличная)
1	$\Delta t = 1.74$ с $h = 1\%$ $ITAE = 0.1569$	$\Delta t = 1.26$ с $h = 1\%$ $ITAE = 0.1225$	$\Delta t = 1.74$ с $h = 1\%$ $ITAE = 0.1569$
2	$\Delta U\% = 23.8\%$ $\Delta t = 2.55$ с $h = 1\%$ $ITAE = 0.1032$	$\Delta U\% = 22.7\%$ $\Delta t = 1.1$ с $h = 0.5\%$ $ITAE = 0.0652$	$\Delta U\% = 24\%$ $\Delta t = 1.3$ с $h = 0\%$ $ITAE = 0.0684$
3	$\Delta U\% = 13.7\%$ $\Delta t = 2$ с $h = 3\%$ $ITAE = 0.1205$	$\Delta U\% = 13.5\%$ $\Delta t = 1.48$ с $h = 1.2\%$ $ITAE = 0.0264$	$\Delta U\% = 13.5\%$ $\Delta t = 1.45$ с $h = 1.3\%$ $ITAE = 0.025$
4	$\Delta U\% = 24.7\%$ $\Delta t = 4.3$ с $h = 0\%$ $ITAE = 0.882$	$\Delta U\% = 24\%$ $\Delta t = 3.1$ с $h = 1\%$ $ITAE = 0.653$	$\Delta U\% = 24\%$ $\Delta t = 2.8$ с $h = 0.7\%$ $ITAE = 0.621$
5	$\Delta U\% = 29.4\%$ $\Delta t = 4.3$ с $h = 2\%$ $ITAE = 0.262$	$\Delta U\% = 31\%$ $\Delta t = 1.79$ с $h = 1\%$ $ITAE = 0.131$	$\Delta U\% = 29.2\%$ $\Delta t = 1.75$ с $h = 0.7\%$ $ITAE = 0.117$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования по влиянию величины и длительности провалов напряжения и перенапряжений на работу микропроцессорной техники [14] показали, что провалы напряжения хоть и не приводят к порче оборудования на базе ЭВМ, однако могут привести к ее отключению, потере информации и прерыванию технологических процессов, что, в свою очередь, может стать причиной поломки оборудования и даже возникновения аварий.

Проведенное сравнение существующих методов настройки показывает, что каждый из них обладает целым рядом недостатков, которые не позволяют обеспечить качество переходного процесса в некоторых режимах, особенно «тяжелых», связанных с набросом и сбросом статической нагрузки соизмеримой мощности, пуском асинхронных двигателей. В связи с этим актуальной является задача разработки качественно нового подхода, который позволил бы производить автоматическую настройку параметров ПИД-регулятора возбуждения синхронного генератора в различных режимах работы, т. е. объединил бы достоинства табличного метода управления и методов автоматической настройки.

Список используемых источников

1. Astrom K.J., Hagglund T. Advanced PID-control // ISA The Instrumentations, Systems and Automation Society. – 2006. – P. 317–325.

2. A multi-layer architecture for distributed data acquisition // Proceedings of the 19th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2002. – 2002. – Vol. 2. – P. 1261–1264.
3. Денисенко В. В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. – М. : Горячая линия-Телеком, 2009. – 598 с.
4. Leva A., Cox C., Ruano A. Hands-on PID autotuning: a guide to better utilization // IFAC Professional Brief. – URL: <http://www.ifac-control.org> (дата обращения: 23.03.2023).
5. Denisenko V. V. Nonparametric Model for PID Controller Autotuning // 18th IEEE International Conference on Control Applications. Part of 2009 IEEE Multi-conference on Systems and Control. Saint-Petersburg, Russian, July 8–10, 2009. – P. 43–47.
6. Медведев А. В. Непараметрические алгоритмы идентификации нелинейных динамических систем // Стохастические системы управления. – Новосибирск : Наука. 1979. – С. 15–22.
7. ГОСТ 13244-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения : [введ. 01.07.2014]. – М. : Стандартинформ, 2014. – 19 с.
8. Griffin I. On-line PID Controller // Tuning using Genetic Algorithms / Dublin City University. – 2003. – P. 8–15.
9. Optimal design of PID controllers for time delay systems using genetic algorithm and simulated annealing [C] / A. Gupta [et al.] // International Conference on Innovative Mechanisms for Industry Applications (ICIMIA). IEEE. – 2017. – P. 47–54.
10. Ou C., Lin W. Comparison between PSO and GA for parameters optimization of PID controller // Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA '06). – June 2006. – P. 2471–2475.
11. Рух В.Дж., Шэмма Дж.С. Исследование в области табличного управления // Автоматика. – 2000. – № 36. – С. 1401–1425.
12. Методическое руководство к курсовому и дипломному проектированию по основам автоматики и автоматизации технических систем / А. Н. Камнев [и др.]. – Л. : ЛВВИСКУ, 1978. – Ч. 1 : Расчет систем автоматического регулирования возбуждения синхронных генераторов. – 247 с.
13. Свид. 2023680059. Модель системы автономного электроснабжения: программа для ЭВМ / И. В. Хомич, В. В. Карагодин, С. С. Камчалов (RU); правообладатель И. В. Хомич. – № 2023680059; заявл. 03.05.2023; опублик. 25.09.2023 в Реестре программ для ЭВМ. – 1 с.
15. IEEE Std 446, Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications. – 1995. – URL: <https://standards.ieee.org/ieee/446/669/> (дата обращения: 26.11.2023).

Ю. А. Клейменов¹,

доктор технических наук, старший научный сотрудник;

Р. З. Хайруллин²,

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник

^{1, 2}ГНМЦ Министерства обороны Российской Федерации, г. Мытищи Московской обл.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА СТОХАСТИЧЕСКОГО СУПЕРИНДИКАТОРА ПРИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ВИДА ЗАКОНА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МАЛЫХ ВЫБОРОК В ЗАДАЧАХ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ БЕЗОТКАЗНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Предложены и исследованы модификации экспоненциального закона распределения в формах сложно-экспоненциальной зависимости и распределения Гомперца – Макегама. Описано применение математического аппарата теории характеристических функций и операторных рядов для моделирования случайных величин. Для распределения Гомперца – Макегама приведены аналитические формулы разложения в операторный ряд. Для определения тенденции изменения определяющего параметра сложной технической системы применяется метод стохастического супериндикатора, предназначенный для идентификации вида закона распределения по результатам статистической обработки малых выборок. Представлены результаты моделирования рациональной продолжительности жизненного цикла сложной технической системы.

Ключевые слова: малая выборка, метод стохастического супериндикатора, распределение Гомперца – Макегама, продолжительность жизненного цикла.

ВВЕДЕНИЕ

С 2010 года в Российской Федерации введен в действие национальный стандарт ГОСТ Р 27.004-2009 «Надежность в технике. Модели отказов». Он распространяется на изделия любых видов техники, для которых предусматривают и решают задачи прогнозирования безотказности и обработки статистических данных об отказах на различных стадиях их жизненного цикла (ЖЦ). Однако в условиях малых выборок [1–5] применение указанного стандарта невозможно, поскольку в нем в качестве моделей отказов уже используются функции распределения случайных величин, а не выборки из генеральной совокупности.

Содержание статьи ориентировано на разработку и применение комплекса методов, алгоритмов и моделей, позволяющих в условиях малых выборок идентифицировать начало резкого изменения определяющего параметра сложных технических систем (СТС), к которым, безусловно, относятся большинство образцов, комплексов и систем вооружения и военной техники, в том числе эталоны и установки высшей точности. Целью разработки и применения указанного комплекса является принятие решения о целесообразности продолжения дальнейшей эксплуатации СТС в штатном режиме, о продлении срока эксплуатации на некоторое время либо о выведении СТС из эксплуатации [6, 7]. В качестве определяющего параметра выбрана интенсивность отказов СТС.

Как известно [8], весь период эксплуатации можно условно разделить на три части: период приработки, период эксплуатации в штатном режиме и период деградации (резкое возрастание интенсивности отказов). В представленной работе исследуется переход от второго периода к третьему.

При построении прогноза тенденции изменения интенсивности отказов СТС статистическими методами необходимо иметь ответ на вопрос: подчиняется ли интенсивность, как случайная величина, определенному закону распределения. Однако проблема малых выборок состоит в том, что обычные параметрические тесты оказываются несостоятельными, а по-

строение статистических оценок – невозможным. Возникает необходимость разработки и применения специальных методов снижения неопределенности в задаче прогнозирования тенденции изменения интенсивности отказов СТС.

Одним из возможных способов снижения неопределенности является применение метода стохастического супериндикатора (МСС). Стохастическим супериндикатором называют вероятность события, исход которого зависит от соотношения двух или нескольких случайных величин. Стохастический супериндикатор образует непараметрический критерий согласия.

Применение супериндикатора позволяет осуществить идентификацию распределения (проверить статистическую гипотезу о принадлежности малой выборки генеральной совокупности к определенному закону распределения). Однако нередко в условиях малых выборок наблюдается эффект, состоящий в том, что одновременно к положительному результату приводят несколько проверяемых гипотез (проверяемые гипотезы не отвергаются). В этих условиях представляется целесообразным использовать концепцию принципа максимума энтропии для упорядочения альтернативных законов распределения.

Для оценки продолжительности ЖЦ СТС за основу выбран экспоненциальный закон распределения отказов. Предложены и исследованы модификации экспоненциального закона в формах сложно-экспоненциальной зависимости и распределения Гомперца – Макегама. Для распределения Гомперца – Макегама описан алгоритм применения математического аппарата теории операторных рядов для моделирования случайной величины интенсивности отказов. Приведены аналитические формулы разложения функции распределения в операторный ряд. Для определения тенденции изменения определяющего параметра СТС применяется МСС.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Требуется разработать метод идентификации вида закона распределения определяющего параметра СТС (эталонов и установок высшей точности) по результатам статистической обработки ограниченного объема измерений x_1, x_2, \dots, x_n , $n = 3 \div 5$ определяющего параметра СТС на основе МСС и предложенного в статье алгоритма синтеза случайных величин по заданному закону распределения. В качестве определяющего параметра используется интенсивность отказов, а вид закона его распределения должен быть выбран на основе проведенного анализа ряда законов распределения экспоненциального типа и статистических данных по отказам СТС. Разработанный метод должен позволять прогнозировать начало резкого изменения определяющего параметра СТС с целью принятия решения о возможности дальнейшей эксплуатации СТС или о выведении СТС из эксплуатации.

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ

Используемые распределения случайных величин

1. Экспоненциальное распределение. Оно имеет вид

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}. \quad (1)$$

Здесь λ – интенсивность отказов (постоянная величина), $\lambda = 1/\bar{t}$, где \bar{t} – среднее время до отказа. Величина параметра λ зависит от объема выборки (как правило, исследователь имеет в своем распоряжении выборку малого объема), а также от типа технической системы.

Распределение (1) широко применяется в работах по надежности, к нему приводят различные идеализированные модели. Однако в связи с тем, что это распределение определяется только одним параметром, основанные на нем методы часто оказываются чувствительны-

ми даже к незначительным отклонениям «хвоста» распределения. Отметим также, что для соотношения (1) интенсивность отказов λ постоянна. Поэтому рассмотрим обобщения экспоненциального распределения, описывающие функцию интенсивности отказов более адекватно и сводящиеся к экспоненциальному распределению при подходящем выборе их параметров.

2. Сложно-экспоненциальное распределение. Предположим, что параметр λ является случайной величиной с плотностью вероятности $f(\lambda)$. Тогда из выражения (1) следует:

$$f(t) = \int_0^{\infty} \lambda e^{-\lambda t} f(\lambda) d\lambda. \quad (2)$$

Примем, что плотность распределения параметра λ имеет вид γ -распределения:

$$f(\lambda) = \frac{1}{\Gamma(k)} \rho^k \lambda^{k-1} e^{-\rho\lambda}. \quad (3)$$

Следует отметить, что $k = \bar{\lambda}^2 / \varepsilon^2$ – параметр формы; $1/\rho$ – параметр масштаба, при этом $\rho = \bar{\lambda} / \varepsilon^2$, где ε – характеристика величины погрешности (средняя квадратическая ошибка), $\bar{\lambda} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_i$, $\lambda_i = 1/\bar{t}_i$, $i = 1, 2, \dots, n$; \bar{t}_i – средняя длительность ЖЦ i -го типа технических устройств. Гамма-распределение широко используется при моделировании надежности «многокомпонентных» СТС, включающих несколько разных типов технических устройств.

Сложно-экспоненциальное распределение по сравнению с выражением (1) является более гибким, поскольку оно имеет два параметра. Приняв $\rho = k / \bar{\lambda}$, $\bar{\lambda} = \lambda_0$ и проинтегрировав формулу (2) с учетом соотношения (3), получим

$$f(t) = k \left(\frac{k}{\lambda_0} \right)^k \left(\frac{k}{\lambda_0} + t \right)^{-k-1}. \quad (4)$$

Проинтегрировав выражение (4), получим интегральный закон для сложно-экспоненциального распределения:

$$F(t) = 1 - \frac{(k/\lambda_0)^k}{(t + k/\lambda_0)^k}. \quad (5)$$

Отметим, что формулы (4) и (5) являются плотностью распределения и функцией распределения модифицированного распределения Парето. В пределе при $k \rightarrow \infty$ сложно-экспоненциальное распределение сходится к экспоненциальному распределению (1).

Интенсивность отказов может быть вычислена по формуле

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)}. \quad (6)$$

3. Распределение Гомперца – Макегама. Предположим, что функция интенсивности отказов $\lambda(t)$ имеет временной тренд и описывается уравнением

$$\lambda(t) = a + b e^{\lambda t}, \quad (7)$$

где a , b и λ – числовые параметры. В уравнении (7) интенсивность будет определяться двумя составляющими: константой a , не зависящей от длительности ЖЦ СТС, и слагаемым, экспоненциально растущим с «возрастом». Отметим, что параметры a , b и λ могут быть найдены на основе обработки статистических данных с использованием известных алгоритмов (методы трех сумм, трех точек и др.). С увеличением «возраста» СТС функция интенсивности отказов (7) будет экспоненциально стремиться к бесконечности.

Соответствующая функция плотности распределения Гомперца – Макегама имеет вид

$$f(t) = \left(a + b e^{\lambda t} \right) \cdot e^{-at - \frac{b}{\lambda} (e^{\lambda t} - 1)}. \quad (8)$$

Принимая во внимание асимметричность закона (8), его широко применяют при аппроксимации статистических данных и для определения тренда развития определяющего параметра СТС. В настоящей работе будем использовать закон (8) для исследования тенденции изменения интенсивности отказов на этапе деградации СТС.

Сравнительный анализ интенсивностей отказов различных видов СТС показал, что распределение Гомперца – Макегама позволяет более адекватно моделировать отказы и в то же время моделировать тенденции резкого увеличения интенсивности отказов на этапе деградации СТС.

Приведем сначала основные формулы метода операторных рядов [4], а затем применим их для генерирования малых выборок из распределения Гомперца – Макегама.

Рассматриваемые методы

1. Метод операторных рядов [4, 9]. Рассмотрим один из моделирующих алгоритмов, позволяющих получать случайные величины с заданной плотностью распределения $\varphi(x)$.

В соответствии с общей схемой применения метода операторных рядов [4] представим случайную величину X в виде

$$X = \sum_{v=1}^{\infty} \frac{(Y + y_0)^v}{v!} D_x^v \Big|_{x_0}, \quad (9)$$

где Y – случайная величина, равномерно распределенная на отрезке $[0;1]$. В формуле (9) используется оператор $D = \frac{1}{\varphi(x)} \frac{d}{dx}$. Свойства указанного оператора: $D_x^{v+1} = D(D_x^v)$, $D_x^0 = X_0$,

$D_x^1 = \frac{1}{\dot{\varphi}(x)}$, где D_x^v – оператор преобразования v -го порядка, $\varphi(x)$ – заданная функция распределения искомой случайной величины; $y_0 = \varphi(x_0)$ – значение функции в выбранной опорной точке $x = x_0$, в которой предполагается что $\dot{\varphi}(x_0) \neq 0$. Точка над буквой означает операцию дифференцирования.

Опишем алгоритм применения (9) для распределения Гомперца – Макегама.

Дифференциальный оператор имеет вид $D = \frac{e^{ax + \frac{b}{\lambda} e^{\lambda x - 1}}}{a + b e^{\lambda x}} \frac{d}{dx}$. Выбрав опорную точку $x_0 = 0$,

приведем первые пять членов операторного ряда для распределения Гомперца – Макегама:

$$D_{x_0}^0 = 0; \quad D_x^1 = \frac{e^{b/\lambda e}}{a+b}, \quad D_x^2 = (D_{x_0}^1)^2 d_1, \quad D_x^3 = (D_{x_0}^1)^3 (2d_1^2 + d_2),$$

$$D_x^4 = (D_{x_0}^1)^4 \left(6d_1^3 + 7d_1 d_2 + \frac{b\lambda^2}{e} - \frac{ab\lambda^3(a-b)}{(a+b)^3} \right),$$

$$\text{где } d_1 = a + \frac{b}{e} - \frac{b\lambda}{a+b}, \quad d_2 = \frac{b\lambda}{e} - \frac{ab\lambda^2}{(a+b)^2}.$$

Отметим, что для практического использования достаточно пяти членов ряда.

Описанный алгоритм позволяет формировать выборки (в том числе малые) для исследования тенденции изменения интенсивности отказов на этапе деградации СТС.

2. Метод стохастического супериндикатора [4].

Общая схема метода. Стохастический супериндикатор образует непараметрический критерий согласия. Наличие супериндикатора позволяет осуществить проверку гипотезы о принадлежности малой выборки генеральной совокупности с определенным законом распределения. В соответствии с общей схемой проверки статистических гипотез выдвигается ос-

новная гипотеза H_0 о виде закона распределения генеральной совокупности, к которой принадлежит исследуемая малая выборка x_1, x_2, \dots, x_n и альтернативная гипотеза H_1 . По данной выборке вычисляется расчетное значение супериндикатора S^* и сравнивается с соответствующим критическим значением $S_{кр}$. Принимается решение о неотвержении или отвержении выдвигаемой гипотезы. В зависимости от реализуемой гипотезы принимается решение о продолжении эксплуатации в штатном режиме, продлении срока эксплуатации СТС на определенный период или о прекращении эксплуатации.

Для проверки принадлежности выборки x_1, x_2, \dots, x_n к определенному закону распределения строится вариационный ряд, который упорядочен по возрастанию значений: $x_{(1)}^{(n)}, x_{(2)}^{(n)}, \dots, x_{(n)}^{(n)}$ (здесь нижний индекс – порядковый номер случайной величины в ранжированной выборке, а верхний индекс – размерность выборки).

Функции распределения для максимального элемента $x_{(n)}^{(n)}$ и минимального элемента $x_{(1)}^{(n)}$ имеют вид

$$F_{\max} = (F(x))^n \text{ и } F_{\min} = 1 - (1 - F(x))^n. \quad (10)$$

Для k -го члена выборки функция распределения имеет громоздкий вид, поэтому приведем выражение для плотности распределения:

$$f_k = k C_n^k (F(x))^{k-1} (1 - F(x))^{n-k} f(x). \quad (11)$$

Опишем алгоритмы расчета значений супериндикатора и правило его применения для основных видов законов распределения.

Расчет супериндикатора для идентификации экспоненциального закона распределения. Инвариантное преобразование имеет вид

$$\Omega_i = \frac{x_{(i)}^{(n)}}{x_{(n)}^{(n)}}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (12)$$

а плотность совместного распределения первых $m \leq n-1$ членов вариационного ряда будет следующей:

$$G\{\Omega_1, \dots, \Omega_m\} = \frac{(m+1)!}{(1 + \Omega_1 + \dots + \Omega_m)^{m+1}}. \quad (13)$$

Расчетное значение супериндикатора определится как

$$S^* = G\{x_{(1)}^*, \dots, x_{(n-1)}^*\} = \int_0^{\Omega_1^*} \dots \int_0^{\Omega_{n-1}^*} \frac{n!}{(1 + \Omega_1 + \dots + \Omega_m)^{n-1}} d\Omega_1 \dots d\Omega_{n-1}. \quad (14)$$

Расчет супериндикатора для равномерного распределения. Инвариантное преобразование имеет вид

$$\Omega_i = \frac{x_{(i)}^{(n)} - x_{(1)}^{(n)}}{x_{(n)}^{(n)} - x_{(1)}^{(n)}}, \quad i = 2, \dots, n-1, \quad (15)$$

а плотность совместного распределения –

$$G\{\Omega_2, \dots, \Omega_{n-1}\} = 1. \quad (16)$$

Расчетное значение супериндикатора определим как

$$S^* = G\{x_{(2)}^*, \dots, x_{(n-1)}^*\} = \prod_{i=2}^{n-1} \Omega_i^*. \quad (17)$$

Правило принятия решения о виде закона распределения. В работах [4, 10] приведены таблицы критических значений супериндикатора $S_{кр}$ для диапазона доверительной вероятности $\alpha = 0,50 \div 0,95$ и размерности малых выборок $n = 2 \div 5$ для равномерного, экспоненциаль-

ного и нормального законов распределения. По результатам сравнения расчетного значения S^* и критического значения $S_{кр}$ принимается решение о неотвержении основной статистической гипотезы или о ее отвержении.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделирование закона Гомперца – Макегама проводилось при следующих значениях параметров (7): $a = 1$, $b = 0,02$, $\lambda = 1$. Интенсивность отказов (6) представлена на рис. 1.

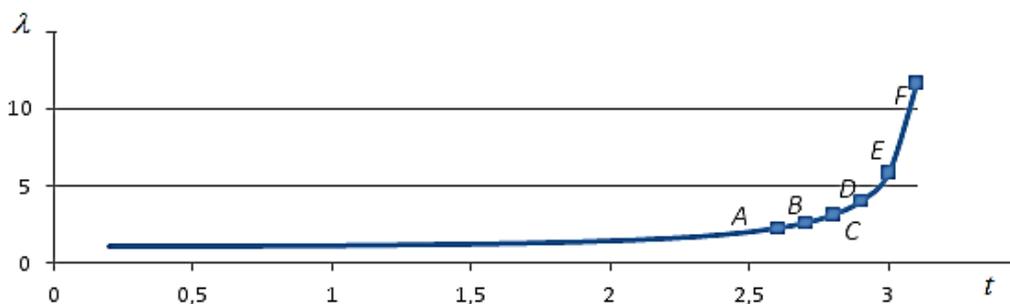


Рис. 1. Функция интенсивности отказов для распределения Гомперца – Макегама

Отметим, что функция $\lambda(t)$ визуально имеет ярко выраженный переход от периода эксплуатации в штатном режиме к периоду деградации и резкого увеличения интенсивности отказов. Построение прогноза тенденции перехода осуществлялось с помощью МСС. Исследовались малые выборки объемом 3, 4, 5 элементов, сформированные из точек $A(2,257)$, $B(2,605)$, $C(3,135)$, $D(4,032)$, $E(5,868)$, $F(10,669)$ (рис. 1). Выдвигались основная гипотеза H_0 о принадлежности малой выборки экспоненциальному закону распределения и альтернативная гипотеза H_1 о принадлежности малой выборки равномерному закону. Результаты применения МСС для прогнозирования тенденции изменения интенсивности отказов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты прогнозирования с помощью МСС

№ п/п	Анализируемые выборки	Результаты прогнозирования изменения интенсивности	
		По экспоненциальному закону (H_0)	По равномерному закону (H_1)
1	ABC	Отвергается	Не отвергается
2	ABCD	Отвергается	Не отвергается
3	BCD	Отвергается	Не отвергается
4	CDE	Не отвергается	Не отвергается
5	BCDE	Не отвергается	Не отвергается
6	CDEF	Не отвергается	Не отвергается
7	BCDEF	Не отвергается	Не отвергается

Анализ таблицы показывает, что экспоненциальный рост интенсивности $\lambda(t)$ прогнозируется только начиная с точки B – для выборки объема 4 и начиная с точки C – для выборки объема 3. При этом во всех рассмотренных случаях гипотеза о равномерном росте интенсивности отказов также не отвергается. С увеличением ретроспективы (с увеличением размерности выборки) МСС позволяет на более ранней стадии идентифицировать тенденцию изме-

нения интенсивности отказов. Так, для выборки объема 4 интенсивный рост идентифицирован начиная с точки B , а для выборки объема 3 – только с точки C .

С точки зрения применения полученных результатов на практике можно рекомендовать следующее. Если H_0 отвергается, то возможно продолжение эксплуатации СТС в штатном режиме. Если H_0 не отвергается и H_1 не отвергается, то возможно продление срока эксплуатации СТС на некоторое время. Если же H_0 не отвергается, а H_1 отвергается, то необходимо прервать эксплуатацию СТС.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В связи с тем, что экспоненциальное распределение определяется только одним параметром, основанные на нем методы часто оказываются неприемлемыми для решения практических задач.

Рассмотренные в статье многопараметрические распределения, являющиеся развитием экспоненциального распределения (сложно-экспоненциальное распределение и распределение Гомперца – Макегама), позволяют создавать более корректные модели эксплуатации СТС.

Сложно-экспоненциальное распределение не имеет ярко выраженной тенденции резкого увеличения интенсивности отказов на этапе старения и деградации СТС, а распределение Гомперца – Макегама имеет указанную тенденцию.

Кроме распределения Гомперца – Макегама существуют и другие распределения (см. например, работу [11]), для которых функция интенсивности отказов имеет все три характерных участка: приработки, эксплуатации в штатном режиме и старения. В настоящей работе такие распределения не исследовались, так как функция плотности распределения [11] имеет более сложный вид и применение метода операторных рядов представляется затруднительным.

Применение МСС позволяет выявлять тенденции резкого роста определяющего параметра СТС на этапах старения и эксплуатации. Вместе с тем МСС целесообразно применять несколько раз последовательно по мере появления дополнительной эмпирической информации. В таком случае вероятность и достоверность выявления тенденции резкого возрастания повышаются.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен алгоритм моделирования функции интенсивности отказов с использованием функции распределения Гомперца – Макегама. Рассмотрен пример оценивания тенденции перехода СТС от этапа эксплуатации в штатном режиме к этапу старения и деградации с использованием МСС. В зависимости от выявленной тенденции в форме равномерного или экспоненциального закона изменения интенсивности отказов, предложено правило принятия решения о дальнейшей эксплуатации СТС или о выведении СТС из эксплуатации.

Список используемых источников

1. Мартыщенко Л. А., Ташевский А. Г. Военно-научные исследования и разработка вооружения и военной техники. – Л. : Изд-во Министерства обороны СССР, 1993. – 253 с.
2. Мартыщенко Л. А. Экстремальные распределения экстремальных случайных величин. – Л. : Изд-во Министерства обороны СССР, 1989. – 40 с.

3. *Мартыщенко Л. А., Ташевский А. Г., Немчинов В. И.* Подтверждение ТТХ сложных систем по малому числу испытаний. – МО СССР, 1985. – 48 с.
4. *Мартыщенко Л. А.* Математические задачи теории малых выборок и их приложения к испытаниям сложных технических систем. – МО СССР, 1985. – 75 с.
5. Техника, экономика. Сер. : Контроль и диагностика. – 1991. – Вып. 1. – С. 10–14.
6. О метрологическом самоконтроле измерительных систем / В. В. Супрунюк [и др.] // Вестник метролога. – 2023. – № 4. – С. 5–9.
7. Встроенный контроль характеристик диаграммы направленности цифровой антенной решетки мобильного радиолокационного комплекса / А. М. Голик [и др.] // Вестник метролога. – 2021. – № 3. – С. 3–8.
8. *Сычев Е. В., Храменков В. Н., Шкитин А. Д.* Основы военной метрологии. – М. : Воен. изд-во, 1993. – 400 с.
9. *Ташевский А. Г.* Математические модели продолжительности жизненного цикла технических систем // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2014. – № 1(190). – С. 169–178.
10. *Мардас Д. А., Рахимжонов Б. Р.* Прогнозирование процессов модернизации производственно-экономических систем // Известия СПбГУТЭ «ЛЭТИ». – 2014. – № 9. – С. 73–76.
11. *Хайруллин Р. З.* Трехпараметрическая диффузионная модель отказов контрольно-измерительных приборов // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2023. – № 2. – С. 128–132.

Ю. А. Кувькин¹,

кандидат технических наук;

А. П. Смирнов²,

доктор технических наук;

В. В. Супрунюк³,

доктор технических наук;

Р. З. Хайруллин⁴,

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник

¹⁻⁴ГНМЦ Министерства обороны Российской Федерации, г. Мытищи Московской обл.

МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ЭКСПЛУАТАЦИИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ С ВСТРОЕННЫМ КОНТРОЛЕМ

Предложена полумарковская модель процесса эксплуатации измерительной системы с встроенным контролем. Особенностью модели является введение в классическую полумарковскую модель процесса эксплуатации средства измерений дополнительных состояний для ожидания переходов в различные другие состояния. Дополнительные состояния использовались для одновременного моделирования контура встроенного контроля и контура поверки измерительной системы в целом, интервал между поверками которой должен устанавливаться в эксплуатационной документации. Время перехода из одних состояний полумарковской модели в другие может осуществляться как в случайные, так и детерминированные моменты времени. Такое изменение в классической полумарковской модели процесса эксплуатации измерительной системы позволило моделировать процессы функционирования измерительной системы с встроенным контролем.

Ключевые слова: измерительная система, встроенный контроль, полумарковская модель.

ВВЕДЕНИЕ

Проблеме моделирования процессов эксплуатации сложных технических систем, в том числе систем с метрологическим обеспечением, посвящено большое количество публикаций [1–5]. Однако вопросы моделирования процессов эксплуатации измерительных систем с встроенным контролем в этих работах не рассматривались.

Измерительная система (ИС) представляет собой совокупность распределенных по объекту измерительных преобразователей (датчиков), связующих и вычислительных компонентов, функционирующих как единое целое. ИС предназначена для получения информации о состоянии объекта посредством первичных источников измерительной информации, ее преобразования, обработки, регистрации и отображения для принятия решений.

В ИС, имеющих неподлежащую демонтажу распределенную структуру размещения элементов на объекте эксплуатации, применяют режим встроенного контроля (ВК) характеристик ИС. Основной целью ВК является снижение вероятности получения недостоверной измерительной информации в период эксплуатации ИС, обуславливающей выход характеристик первичных измерительных преобразователей за установленные допустимые пределы, и поддержание коэффициента готовности ИС к применению на достаточно высоком уровне.

Для оценки влияния режима ВК на процесс эксплуатации ИС авторы статьи разработали соответствующую модель.

МОДЕЛЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ С ВК

Описание процесса эксплуатации ИС с ВК предполагает его представление в виде двухконтурной полумарковской модели.

Опишем возможные состояния ИС с ВК в процессе эксплуатации: E_1 – исправное состояние; $E_1^{(1)}, E_1^{(2)}, E_1^{(3)}, E_1^{(4)}$ – вспомогательные исправные состояния, введенные для возможности моделирования разного времени нахождения в исправном состоянии перед переходом в неисправные состояния и на поверку; $E_2^{(1)}, E_2^{(2)}$ – состояния неисправности перед переходом ИС в состояние поверки и состояние ВК; E_3 – поверка неисправной ИС; E_4 – восстановление ИС; E_5 – поверка исправной ИС; E_6 – состояние ложного отказа; $E_6^{(1)}, E_6^{(2)}$ – вспомогательные состояния ложного отказа перед переходом в состояние поверки или ВК; E_{33} – ВК неисправной ИС; E_{44} – автоматизированное восстановление после обнаружения неисправности после ВК; $E_{44}^{(1)}, E_{44}^{(2)}$ – вспомогательные состояния перед переходом в состояния исправное и полного отказа (для прохождения восстановления в штатном режиме); E_{55} – ВК в состоянии исправности ИС; E_{66} – состояние ложного отказа после ВК; $E_{66}^{(1)}, E_{66}^{(2)}$ – вспомогательные состояния ложного отказа перед переходом в состояние очередного ВК и в состояние поверки неисправной ИС соответственно.

Граф модели ИС с ВК имеет вид, показанный на рис. 1.

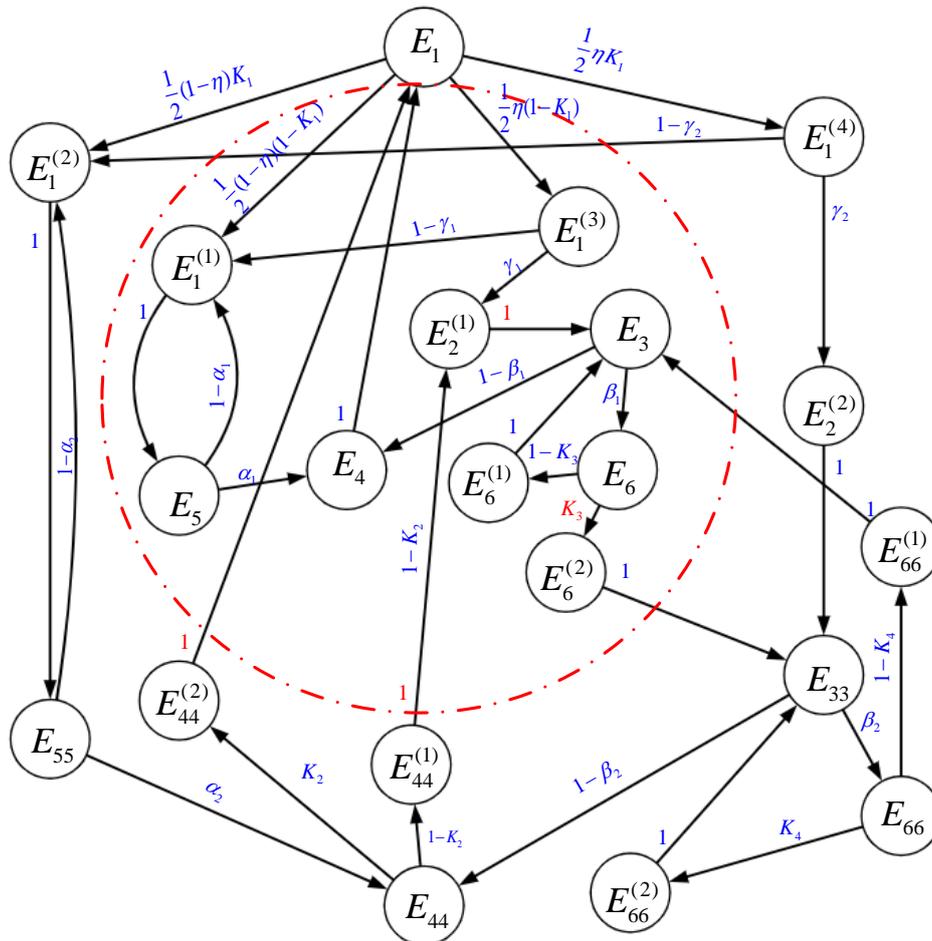


Рис. 1. Граф модели эксплуатации ИС с ВК

Внутри красной штрихпунктирной линии находятся состояния системы, входящие в контур поверки ИС, а вне красной штрихпунктирной линии изображены состояния ВК.

Модель управления ИС с ВК представим структурно в виде алгебраической системы уравнений:

$$\begin{aligned} \pi_1 &= \pi_4 + \pi_{44}^{(2)}, \pi_1^{(1)} = 0,5(1-\eta)(1-k_1)\pi_1 + (1-\gamma_1)\pi_1^{(3)} + (1-\alpha_1)\pi_5, \\ \pi_1^{(2)} &= 0,5(1-\eta)k_1\pi_1 + (1-\gamma_2)\pi_1^{(4)} + (1-\alpha_2)\pi_{55}, \pi_1^{(3)} = 0,5\eta(1-k_1)\pi_1, \\ \pi_1^{(4)} &= 0,5\eta k_1\pi_1, \pi_2^{(1)} = \gamma_1\pi_1^{(3)}, \pi_2^{(2)} = \gamma_2\pi_1^{(4)}, \pi_3 = \pi_2^{(1)} + (1-k_3)\pi_6^{(1)} + \pi_{66}^{(1)}, \\ \pi_4 &= (1-\beta_1)\pi_3 + \alpha_1\pi_5, \pi_5 = \pi_1^{(1)}, \pi_6 = \beta_1\pi_3, \pi_6^{(1)} = (1-k_3)\pi_6, \\ \pi_6^{(2)} &= k_3\pi_6, \pi_{33} = \pi_2^{(2)} + \pi_6^{(2)} + \pi_{66}^{(1)}, \pi_{44} = (1-\beta_2)\pi_{33} + \alpha_2\pi_{55}, \\ \pi_{44}^{(1)} &= (1-k_2)\pi_{44}, \pi_{44}^{(2)} = k_2\pi_{44}, \pi_{55} = \pi_1^{(2)}, \pi_{66}^{(2)} = \beta_2\pi_{33}, \\ \pi_{66}^{(1)} &= (1-k_4)\pi_{66}, \pi_{66}^{(2)} = k_4\pi_{66}. \end{aligned}$$

В приведенной системе уравнений: α_1 и α_2 – условные вероятности ложного отказа при проверке и ВК соответственно; β_1 и β_2 – условные вероятности необнаруженного отказа при проверке и ВК соответственно; γ_1 и γ_2 – вероятности отказов на интервале между двумя последовательными проверками и между двумя последовательными проведениями ВК соответственно; k_1 – полнота выполнения ВК; k_2 – доля ИС, полностью восстановленная после ВК; k_3 – доля ИС, попадающая из состояния необнаруженного отказа после проверки в состояние ВК; k_4 – доля ИС, попадающая из состояния необнаруженного отказа после ВК в состояние проверки; η – коэффициент, характеризующий долю переходов из состояния «работоспособный» в состояние «неработоспособный» или в состояние проверки работоспособной ИС с ВК (значение параметра η зависит от вида и функциональных особенностей ИС с ВК, применяемых видов резервирования отдельных узлов ИС с ВК).

Отметим, что определитель системы уравнений равен нулю. Поэтому вместо одного из уравнений (например, вместо последнего) будем использовать условие нормировки:

$$\begin{aligned} \pi_1 + \sum_{s=1}^4 \pi_1^{(s)} + \pi_2^{(1)} + \pi_2^{(2)} + \sum_{i=3}^6 \pi_i + \pi_6^{(1)} + \pi_6^{(2)} + \pi_{33} + \\ + \pi_{44} + \pi_{44}^{(1)} + \pi_{44}^{(2)} + \pi_{55} + \pi_{66} + \pi_{66}^{(1)} + \pi_{66}^{(2)} = 1. \end{aligned}$$

Тогда определитель системы уравнений становится отличным от нуля, и система уравнений будет иметь единственное решение. Решение системы уравнений осуществляется методом обратной матрицы.

Коэффициент готовности ИС с ТК к применению по назначению вычисляется как отношение суммы произведений вероятностей нахождения в работоспособных состояниях на среднее время (математическое ожидание) нахождения в указанных состояниях к сумме произведений вероятностей $\pi_*^{(*)}$ нахождения во всех состояниях на среднее время (математическое ожидание времени) $\psi_*^{(*)}$ нахождения во всех состояниях:

$$\begin{aligned} K_T &= (\psi_1\pi_1 + \psi_1^{(1)}\pi_1^{(1)} + \psi_1^{(2)}\pi_1^{(2)} + \psi_1^{(3)}\pi_1^{(3)} + \psi_1^{(4)}\pi_1^{(4)}) / Z, \\ Z &= \psi_1\pi_1 + \psi_1^{(1)}\pi_1^{(1)} + \psi_1^{(2)}\pi_1^{(2)} + \psi_1^{(3)}\pi_1^{(3)} + \psi_1^{(4)}\pi_1^{(4)} + \psi_2^{(1)}\pi_2^{(1)} + \psi_2^{(2)}\pi_2^{(2)} + \\ &+ \psi_3\pi_3 + \psi_{33}\pi_{33} + \psi_4\pi_4 + \psi_5\pi_5 + \psi_6\pi_6 + \psi_{44}\pi_{44} + \psi_{44}^{(1)}\pi_{44}^{(1)} + \psi_{44}^{(2)}\pi_{44}^{(2)} + \\ &+ \psi_{55}\pi_{55} + \psi_6^{(1)}\pi_6^{(1)} + \psi_6^{(2)}\pi_6^{(2)} + \psi_{66}\pi_{66} + \psi_{66}^{(1)}\pi_{66}^{(1)} + \psi_{66}^{(2)}\pi_{66}^{(2)}. \end{aligned}$$

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Времена нахождения в состояниях задавались следующим образом:

$$\begin{aligned} \psi_1 &= 0,1, \psi_1^{(1)} = \tau_1, \psi_1^{(2)} = \tau_2, \psi_1^{(3)} = 0,1, \psi_1^{(4)} = 0,1, \psi_2^{(1)} = T_{\Pi} - \tau_1, \\ \psi_2^{(2)} &= T_{\text{ВК}} - \tau_2, \psi_3 = 2, \psi_4 = 1, \psi_5 = 2, \psi_6 = 0,1, \psi_6^{(1)} = T_K, \psi_6^{(2)} = 0,1, \\ \psi_{33} &= 0,5, \psi_{44} = 1, \psi_{44}^{(1)} = 3, \psi_{44}^{(2)} = 1, \psi_{55} = 0,5, \psi_{66}^{(2)} = 0,5, \psi_{66}^{(1)} = T_{\Pi}, \psi_{66}^{(2)} = T_{\text{ВК}}. \end{aligned}$$

Здесь τ_1 – случайная величина, равная времени нахождения в работоспособном состоянии за период между поверками T_{Π} , и τ_2 – случайная величина, равная времени нахождения в работоспособном состоянии за период между проведением ВК $T_{\text{ВК}}$. В дальнейшем будем использовать приведенное значение периодичности ВК $\theta_{\text{ВК}} = T_{\text{ВК}} / T_{\text{РЕГ}}$ и периодичности поверки $\theta_{\Pi} = T_{\Pi} / T_{\text{РЕГ}}$, где $T_{\text{РЕГ}}$ – периодичность проведения регламентных работ.

Расчеты по разработанной модели ИС с ВК в обобщенном графическом виде приведены на рис. 2–6.

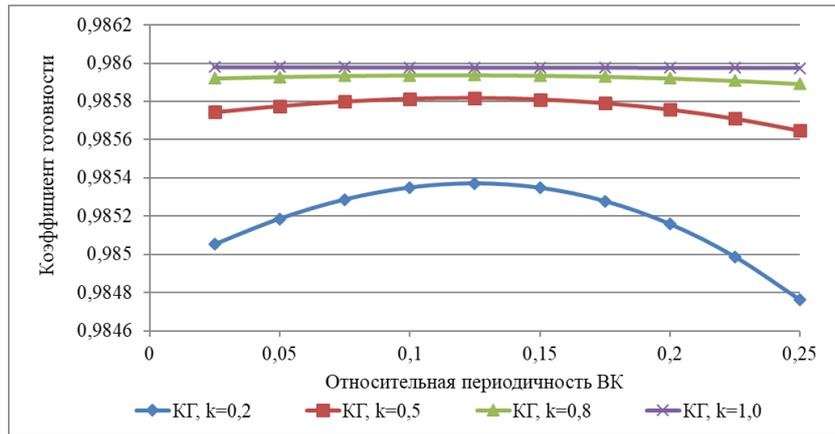


Рис. 2. Зависимость коэффициента готовности ИС с ВК от приведенной периодичности поверки и приведенной периодичности ВК

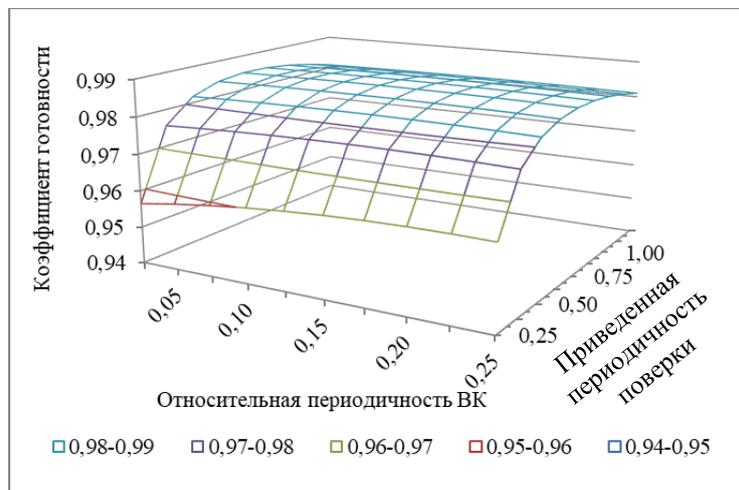


Рис. 3. Зависимость коэффициента готовности ИС с ВК от приведенной периодичности поверки и относительной периодичности ВК

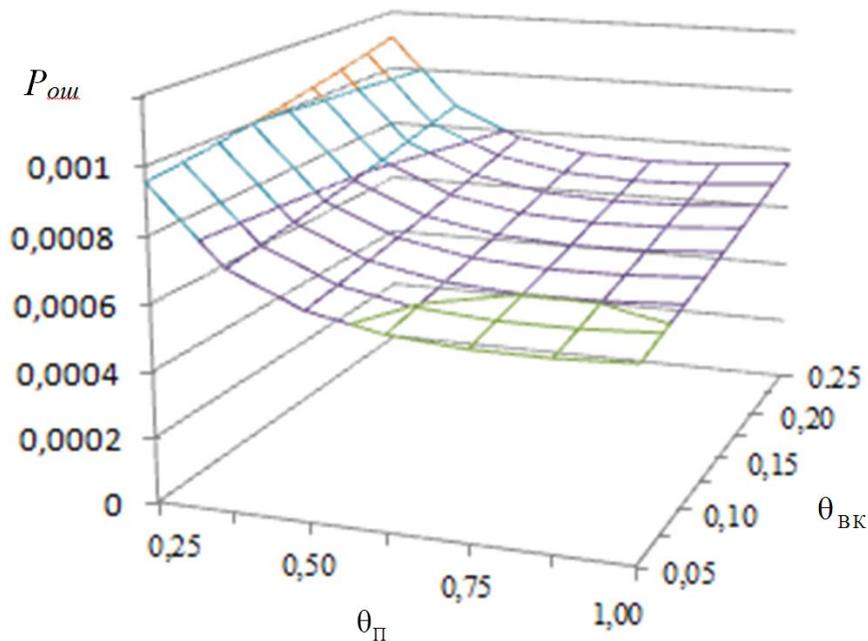


Рис. 4. Зависимость вероятности суммарной ошибки от приведенной периодичности поверки и ВК

Из рис. 2 видно, что максимальное значение коэффициента готовности достигается при рациональном выборе периодичности выполнения ВК.

Данные рис. 3 свидетельствуют о том, что для каждого значения $T_{\text{ВК}}$ существует такое значение $\theta_{\text{П}}$, при котором достигается максимум $K_{\text{Г}}$ (в плоскости параметров $\theta_{\text{П}} \times \theta_{\text{ВК}}$ существует единственная внутренняя точка, в которой достигается максимум $K_{\text{Г}}$).

Отметим, что частое проведение ВК приводит к некоторому уменьшению максимального значения $K_{\text{Г}}$, однако при этом может увеличиться достоверность принятия правильного решения о реальном состоянии ИС. Указанную достоверность будем оценивать с помощью вероятности

$$P(\theta_{\text{П}}, \theta_{\text{МСК}}) = \pi_5(\alpha_1, \theta_{\text{П}}, \theta_{\text{МСК}}) \cdot \alpha_1 \cdot \psi_5 + \pi_{55}(\alpha_2, \theta_{\text{П}}, \theta_{\text{МСК}}) \cdot \alpha_2 \cdot \psi_{55} + \pi_6(\beta_1, \theta_{\text{П}}, \theta_{\text{МСК}}) \cdot \psi_6 + \pi_{66}(\beta_1, \theta_{\text{П}}, \theta_{\text{МСК}}) \cdot \psi_{66},$$

где вероятности нахождения в состояниях зависят как от $\theta_{\text{П}}$ и $\theta_{\text{ВК}}$, так и от условных вероятностей ложного и необнаруженного отказов. При этом вероятность ошибки принятия решения $P_{\text{ош}} = 1 - P(\theta_{\text{П}}, \theta_{\text{МСК}})$.

На рис. 4 изображена зависимость вероятности суммарной ошибки принятия решения $P_{\text{ош}}$ от приведенной периодичности поверки $\theta_{\text{П}}$ и приведенной периодичности ВК $\theta_{\text{ВК}}$.

С уменьшением $\theta_{\text{ВК}}$ вероятность суммарной ошибки также уменьшается (рис. 5).

Таким образом, применение ВК снижает вероятность получения недостоверной информации о состоянии ИС. Также отметим, что $\arg \min P(\theta_{\text{П}}, \theta_{\text{ВК}})$ не совпадает с $\arg \max T_{\text{Г}}(\theta_{\text{П}}, \theta_{\text{ВК}})$. Поэтому конкретные значения параметров (периодичности) поверки и параметров ВК следует выбирать, исходя из приоритетов между снижением достоверности и повышением коэффициента готовности ИС.

Зависимость оптимального приведенного интервала между поверками от приведенной периодичности ВК для разных значений интенсивности отказов $\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3$ представлена на рис. 6.

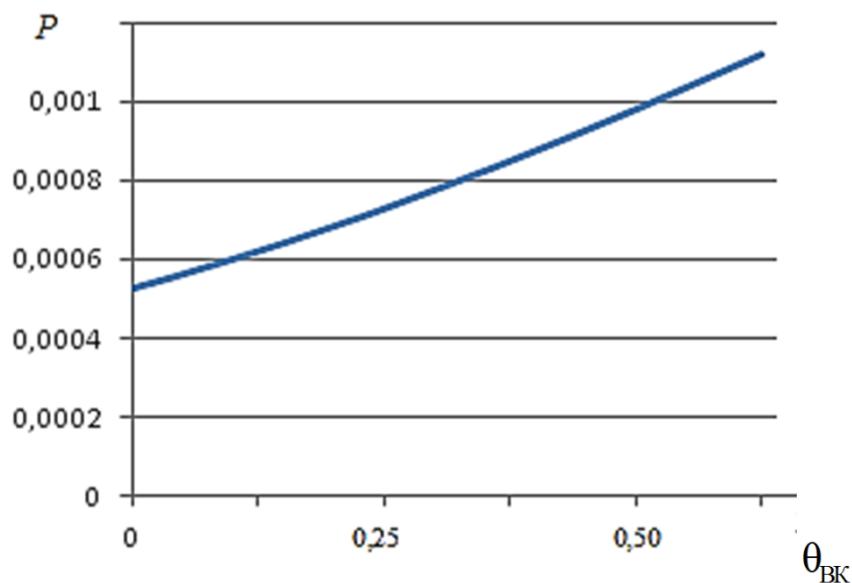


Рис. 5. Зависимость вероятности суммарной ошибки от приведенной периодичности ВК

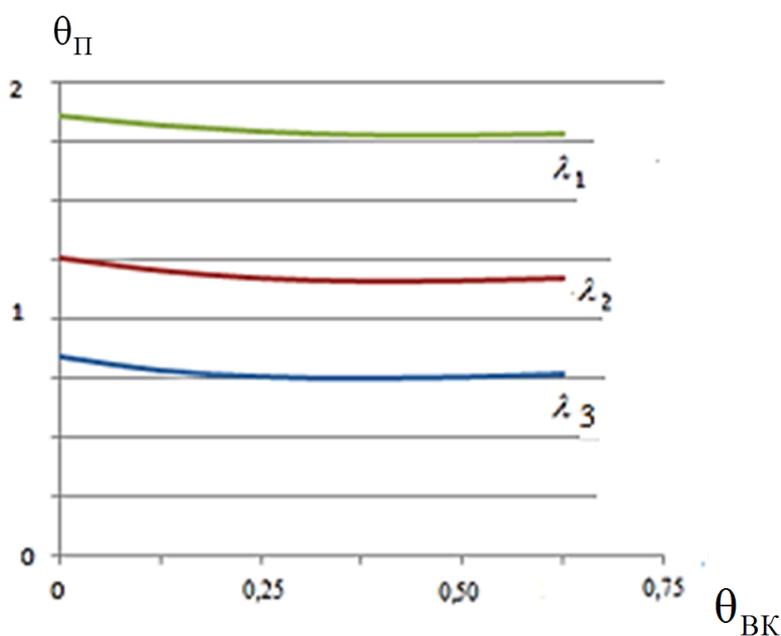


Рис. 6. Зависимость оптимального приведенного интервала между поверками от приведенной периодичности ВК для значений интенсивности отказов ($\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3$)

На основании анализа рис. 6 можно сделать вывод, что путем резервирования, т. е. повышения уровня избыточности измерительной системы, следовательно, и уменьшения интенсивности отказов, возможно увеличить интервал между поверками.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Разработанная полумарковская модель процесса эксплуатации ИС с ВК позволяет оценить вероятности нахождения в стационарных состояниях ИС, которые установятся в реальной ИС с ВК только через некоторое время, равное нескольким интервалам между ее поверками.

Особенностью предложенной в статье полумарковской модели является введение в модель дополнительных состояний для ожидания переходов в различные другие состояния. Положительные результаты данного приема были отмечены в работах [3, 4]. Дополнительные состояния использовались, в том числе, для одновременного моделирования контура ВК и контура поверок ИС, переходы в которые из основного состояния осуществляются в детерминированные моменты времени. Параметры приведенной в статье модели, в частности коэффициенты модели K_i и η , с помощью которых задаются вероятности переходов в дополнительные состояния, могут быть вычислены на основе предварительных экспертных оценок или статистической обработки данных за предшествующий период эксплуатации ИС с ВК. При этом время ожидания в указанных дополнительных состояниях также детерминировано и выбирается достаточно малым, чтобы не оказывать существенного влияния в процессе функционирования системы в целом.

Использование дополнительных состояний незначительно меняет вероятности нахождения в обобщенном состоянии (исходном и всех дополнительных), что позволяет эффективно и адекватно моделировать процессы перехода ИС в неработоспособное состояние, состояния поверок и ВК.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты моделирования процесса эксплуатации ИС с ВК на основании разработанной модели показали, что можно рациональным подбором времени и периодичности проведения ВК добиться необходимых показателей коэффициента готовности ИС, позволяющих периодичность проведения поверок ИС, т. е. интервал между их поверками, совместить с периодичностью проведения регламентных работ объекта, на котором установлена ИС. С применением ВК в ИС представляется возможным повысить надежность работы ИС в целом.

Список используемых источников

1. Сычев Е. И., Храменков В. Н., Шкитин А. Д. Основы метрологии военной техники. – М. : Воен. изд-во, 1993. – 399 с.
2. Сычев Е. И. Метрологическое обеспечение радиоэлектронной аппаратуры. – М. : РИЦ «Татьянин день», 1993 (1994). – 274 с.
3. Мищенко В. И., Кравцов А. Н., Мамлеев Т. Ф. Полумарковская модель функционирования резервируемых средств измерений с учетом периодичности поверки // Измерительная техника. – 2021. – № 4. – С. 22–27. – URL: <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-4-22-27> (дата обращения: 02.04.2024).
4. Хайруллин Р. З. Полумарковская модель эксплуатации и обновления парка измерительной техники // Вестник метролога. – 2023. – № 1. – С. 11–17.
5. Хайруллин Р. З. Оптимизация процессов эксплуатации и обновления парка измерительной техники // Измерительная техника. – 2022. – № 8. – С. 28–34. – URL: <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-8-28-34> (дата обращения: 02.04.2024).

М. В. Окороков¹,

доктор технических наук;

Б. И. Сухорученков²,

доктор технических наук, профессор

^{1, 2}Военная академия РВСН имени Петра Великого, г. Балашиха Московской области.

ПРОБЛЕМА КОНТРОЛЯ БЕЗОТКАЗНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С УЧЕТОМ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ

Приводятся результаты сравнительного анализа безотказности технических систем (ТС) по внезапным отказам и параметрической надежности. Показано, что эти свойства в общем случае принципиально различаются и отражают разные стороны безотказности ТС. Поэтому при контроле безотказности ТС их необходимо учитывать совместно. Изложены способы определения и оценивания вероятности безотказной работы ТС с учетом внезапных и постепенных отказов.

Ключевые слова: техническая система, безотказность, параметрическая надежность, вероятность безотказной работы, статистические оценки показателей.

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность применения по назначению сложных восстанавливаемых технических систем (ТС) существенно зависит от достигнутого в процессе их создания уровня надежности. При этом надежность ТС является комплексным свойством и включает ряд частных свойств, основным из которых является безотказность. Безотказность ТС изначально характеризовалась вероятностью возникновения внезапных отказов ТС [1]. В настоящее время, когда для современных ТС в основном обеспечены высокие показатели безотказности, главные усилия направлены на обеспечение эффективности выполнения целевых задач (ЦЗ), которая представляется в виде параметрической надежности (ПН). В результате ПН стала часто использоваться в качестве общей безотказности ТС.

Сравнительный анализ и рекомендации по использованию способов контроля ПН и показателей безотказности в процессе отработки ТС рассмотрены в работе [2]. В статье [3] приведен достаточно подробный анализ схожести и различия между ПН и собственной надежностью ТС, выраженной через параметры и показатели соответственно. В данной работе автором впервые рассмотрен вопрос об общности параметрического и функционального подходов определения надежности. Показано, что параметрическая надежность и функциональная выступают как части целого и в частных случаях имеют пересечения. В указанной работе это утверждение основывается на предположении, что абсолютно все параметры состояния (ПС) и принципы их изменения в процессе функционирования ТС, влияющие на уровень ее надежности, точно известны. Однако для большинства сложных ТС такие сведения получить практически невозможно. При этом в упомянутой работе не рассматривается важный проблемный вопрос влияния общего показателя (с учетом параметрической надежности и функциональной) на достоверность контроля надежности ТС по результатам отработки и эксплуатации.

Проблема контроля безотказности ТС с учетом параметрической надежности рассматривается далее при следующих допущениях:

- 1) безотказность ТС учитывает только внезапные отказы ТС;
- 2) параметрическая надежность ТС характеризуется случайными ПС, для которых заданы допустимые пределы;
- 3) показатели безотказности и параметрической надежности ТС определяются по экспериментальным данным.

1. БЕЗОТКАЗНОСТЬ И ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ НАДЕЖНОСТЬ ТС

В соответствии с ГОСТ [4] определение *надежности* в общем виде представлено как свойство объекта сохранять во времени способность выполнять требуемые функции в заданных режимах, условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования. Требуемые функции и критерии их выполнения устанавливаются в нормативной, конструкторской, проектной, контрактной или иной документации на объект. При этом следует отметить, что требуемые функции относятся только к области надежности объекта, так как объект может обладать также свойствами экономичности, безопасности, экологичности и др. Критерии выполнения требуемых функций могут быть установлены, например, заданием для каждой функции набора определяющих параметров, характеризующих способность ее выполнения, а также допустимых (требуемых) пределов изменения значений этих параметров. В таком случае понятие «надежность» можно определить как свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих его способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, стратегиях технического обслуживания, хранения и транспортирования [5]. С учетом множества интерпретаций понятия надежности, приведенных в ГОСТ [4, 5], в работе [3] определение надежности уточняется и позволяет учесть как параметрическую, так и функциональную стороны надежности.

Надо отметить, что определяющим свойством надежности ТС на многих этапах и стадиях жизненного цикла является безотказность. Понятие безотказности в соответствии с ГОСТ [5] тесно связано с понятием работоспособности. *Работоспособность*, в соответствии с [6], – состояние ТС, при котором она способна выполнять заданные функции, сохраняя значения заданных параметров в пределах, установленных нормативно-технической документацией. Вместе с тем надежность определяется как свойство изделия сохранять во времени свою работоспособность [6].

Безотказность ТС тесно связана с понятием отказов. Виды и причины возможных отказов ТС изложены в работе [6]. В результате безотказность ТС, в соответствии с названием, обычно рассматривается как свойство ТС работать без внезапных отказов (отказов функционирования), при возникновении которых ТС полностью прекращает работу. Поэтому при создании ТС прежде всего предъявляются требования к показателям безотказности. Далее в статье под безотказностью ТС будем понимать только свойство ТС функционировать без внезапных отказов.

Параметрическая надежность (ПН) ТС рассмотрена А. С. Прониковым в работе [6] как надежность, связанная не с отказом функционирования изделия, а с изменением его выходных параметров. В этом заключается принципиальное отличие ПН от безотказности ТС. Однако в книге [6] не дано определение собственно параметрической надежности, хотя понятно, что под этим понимается способность ТС сохранять параметры состояния в заданных (установленных, требуемых) пределах. В ГОСТ [5] параметрическая надежность непосредственно не рассматривается, но безотказность определяется как свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки в заданных режимах и условиях применения. При этом работоспособное состояние характеризуется набором параметров и допустимых пределов изменения значений этих параметров, что, по существу, соответствует понятию параметрической надежности. Из этого следует, что в ГОСТ понятия безотказности и параметрической надежности не различаются, при этом безотказность ТС подпадает под определение параметрической надежности.

Свойство параметрической надежности ТС тесно связано с понятием параметров состояния (ПС), на основе которых определяется уровень параметрической надежности. Параметры состояния в издании [6] определяются как выходные параметры машины – числовые показатели ее технических характеристик, которые определяют состояние машины и ее возможности по выполнению заданных функций. Параметрами состояния являются только техниче-

ские показатели, которые создаются и поддерживаются в процессе эксплуатации и целевого использования ТС и от которых непосредственно зависит уровень параметрической надежности ТС. В качестве ПС могут использоваться, например, давление, температура, скорость движения, создаваемое электрическое напряжение, механическая нагрузка и др. В то же время технические характеристики ТС, такие как размеры, объем, масса, плотность, чистота поверхности и др., которые практически не влияют на безотказность ТС, не могут использоваться как ПС при определении параметрической надежности. С другой стороны, на параметрическую надежность ТС могут влиять факторы внешней среды и воздействия других ТС. Показатели этих факторов также не могут использоваться как ПС, они отражаются в нормативно-технической документации в качестве допустимых условий использования ТС при эксплуатации.

Параметры состояния могут характеризовать разные стороны работоспособности ТС и ее подсистем, которые в общем случае образуют иерархическую структуру. Например, параметрическая надежность ракетного двигателя на твердом топливе (РДТТ) зависит от вектора тяги (модуля, направления и органов управления). В то же время величина тяги зависит от давления в камере сгорания (КС), температуры горения топлива, характеристик ракетного сопла, органов управления поворотным соплом и др. В свою очередь, давление в КС двигателя зависит от состава, плотности, конфигурации и площади поверхности заряда твердого топлива, размеров и объема КС, наличия, распределения и размеров возможных трещин в заряде и т. д. Пример иерархической структуры ПС РДТТ показан на рис. 1.

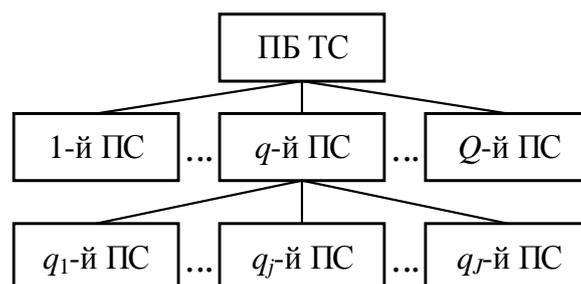


Рис. 1. Иерархическая структура параметров состояния ТС

Среди ПС можно выделить две основные группы по степени влияния их на параметрическую надежность ТС. Основную роль играют выходные ПС [6], которые непосредственно влияют на ПН ТС и подсистем и относятся к верхним уровням иерархии, которые в той или иной степени характеризуют качество функционирования ТС. Другую группу ПС можно назвать внутренними, это ПС нижних уровней иерархии, которые влияют на выходные ПС. Например, для ракетносителя (РН) выходными ПС являются параметры траектории выведения космического аппарата (КА), в первую очередь это параметры при отделении КА от РН, от которых зависит успешность пуска. Внутренними ПС для РН являются характеристики корпуса ракеты, двигателей, системы управления, органов управления и др. Вместе с тем выходным параметром двигателя является вектор тяги, а внутренними ПС – характеристики камеры сгорания, топлива, органов поворота сопла и др.

Для определения параметрической надежности ТС обычно используется ограниченное число ПС (в основном верхнего уровня иерархии), прежде всего выходные ПС, которые можно контролировать (измерять непосредственно или определять по косвенным измерениям). Если такие ПС не удается контролировать, то для определения ПН используются внутренние параметры, которые можно измерять и на их основе определять выходные ПС. Однако при определении ПН ТС необходимо учитывать все ПС, которые могут влиять на ПН ТС.

Как отмечено в работе [6], для определения параметрической надежности сложных ТС могут использоваться обобщенные ПС, отражающие техническое состояние и эффектив-

ность ТС или нескольких подсистем. Например, это могут быть показатели мощности, экономичности, точности функционирования, эффективности при решении целевой задачи и др. Однако такие показатели характеризуют не только безотказность, но и другие специальные свойства, поэтому рассматривать их в качестве показателей безотказности ТС не совсем корректно. Обобщенные показатели качества и эффективности ТС обычно используются и учитываются отдельно от других показателей параметрической надежности. Например, в области артиллерийской и ракетной техники важные показатели дальности стрельбы, точности попадания в цель, эффективности поражения цели рассматриваются отдельно от показателей безотказности и учитываются наряду с другими показателями при контроле боевой эффективности вооружения.

Необходимо отметить, что надежность ТС включает несколько различных свойств ТС [5]. Поэтому понятие «параметрическая надежность», введенное в [6], не совсем корректно. Если ПН относится к области надежности, то должны быть и параметрическая ремонтпригодность, и параметрическая долговечность и др. Поэтому параметрическую надежность ТС более корректно обозначать как параметрическую безотказность. Однако пока будет использоваться термин «параметрическая надежность», введенный в [6].

Снижение уровней безотказности или параметрической надежности ТС приводит к существенно разным результатам: если при выходе ТС за заданные пределы ТС еще может функционировать, например, вследствие больших запасов работоспособности, прочности и др., то при внезапном отказе ТС полностью прекращает работу. Несмотря на то, что для некоторых простых ТС есть возможность найти общее между параметрическим и функциональным подходами к надежности [3], следует признать, что в общем случае для большинства сложных ТС безотказность и параметрическая надежность ТС – это принципиально разные свойства. Поэтому использовать показатели ПН в качестве показателей безотказности ТС не совсем корректно.

Таким образом, уровни безотказности и параметрической надежности ТС характеризуются разными показателями, которые рассматриваются далее.

2. ПОКАЗАТЕЛИ БЕЗОТКАЗНОСТИ И ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ ТС

2.1. Показатели безотказности ТС

Уровень безотказности ТС с учетом возможных внезапных отказов можно характеризовать различными показателями, которые отражают вероятность физического функционирования ТС [6]. Такими показателями являются вероятность безотказной работы, средняя наработка между отказами и интенсивность отказов [5]. Данные показатели безотказности ТС описаны в многочисленных публикациях. Особенностью показателей безотказности являются их математические взаимосвязи, на основе которых по одному известному показателю можно определить остальные [5, 7].

Основной показатель безотказности – это вероятность безотказной работы (ВБР) ТС в течение некоторого периода. Особенностью ВБР является то, что ее нельзя измерить непосредственно в процессе наблюдений или функционирования ТС. При этом ВБР характеризует уровень безотказности не каждого отдельно взятого образца, а только некоторой совокупности одинаковых образцов ТС. Даже если ВБР ТС имеет высокий уровень, каждый конкретный образец ТС в процессе работы может отказать.

2.2. Показатель параметрической надежности ТС

Показатель параметрической надежности (ПН) ТС в работе [6] не определен, а уровень ПН отождествляется с ВБР и определяется с учетом параметрических отказов. Уровень ПН

ТС зависит не только от ПС, но и от допустимых пределов, в которых такие параметры должны находиться. При выходе одного или нескольких ПС за установленные пределы ТС переходит в неработоспособное состояние, которое сопровождается отказом [5]. Вместе с тем обычно ТС физически не отказывает, а продолжает функционировать, хотя и с пониженным качеством. Поэтому данный вид отказа целесообразно называть параметрическим, а в качестве показателя ПН может служить вероятность, что ПС будет находиться в заданных пределах. Существенной особенностью ПН является то, что уровень ПН зависит от значительного числа ПС, рассмотренных в разделе 1. В отличие от нескольких показателей безотказности ТС, в качестве показателя параметрической надежности ТС используется только один показатель в виде вероятности, что все ПС будут находиться в допустимых пределах. Обозначим этот показатель как вероятность параметрической надежности (ВПН) ТС.

3. ОЦЕНИВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ И ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ ТС

Высокие значения ВБР и ВПН ТС обеспечиваются и определяются в процессе создания и отработки ТС, уточняются на основе результатов опытной эксплуатации, контролируются и поддерживаются в процессе эксплуатации ТС. Безотказность и параметрическая надежность ТС характеризуются разными показателями (см. раздел 2). Значения таких показателей определяются в процессе создания ТС на основе различных способов. Наиболее достоверно показатели оцениваются по экспериментальным данным.

3.1. Оценка показателей безотказности ТС

Для определения уровня безотказности ТС могут использоваться несколько показателей. Если они неизвестны, их можно определить по экспериментальным данным статистическими методами.

Оценивание интенсивности отказов и других показателей безотказности ТС. Рассмотрим восстанавливаемые ТС, для которых моменты случайных отказов t имеют экспоненциальное распределение. В этом случае плотность вероятностей (ПВ) моментов t зависит только от одного параметра – интенсивности отказов (ИО) Λ :

$$f(t) = \Lambda \cdot e^{-\Lambda t}, \quad \Lambda > 0. \quad (1)$$

Для определения ИО необходимо провести испытания одного или нескольких образцов ТС. Рассмотрим испытания ТС в течение ограниченных периодов ΔT , при которых регистрируются периоды работы ТС до отказов $t_i \in \Delta T, i = 1, \dots, m$, и (или) безотказная работа ТС в течение периодов $\Delta T_j, j = 1, \dots, J$. Испытания могут проводиться одного пилотного образца восстанавливаемой ТС в течение общего периода T , при этом регистрируются периоды работы ТС до внезапных отказов $t_i, i = 1, \dots, m$, после восстановления работоспособности. Наиболее достоверные статистические оценки ИО получаются по методу несмещенных оценок (МНО) [7]. В соответствии с МНО точечные оценки ИО Λ и их среднеквадратические отклонения (СКО) σ_Λ определяются по зависимостям:

$$\bar{\Lambda} = \frac{(m+1)}{T}; \quad \sigma_\Lambda^2 = \frac{(m+1)}{T^2}, \quad (2)$$

где T – суммарный период работы ТС, который при испытаниях в течение периодов $\{\Delta T_j\}$ определяется по зависимости

$$T = \sum_{i=1}^m t_i + \sum_{j=1}^J \Delta T_j. \quad (3)$$

На основе оценок ИО можно определить среднюю наработку до отказа t_1 и ВБР ТС $P(t)$ в течение любого периода t методом линеаризации по зависимостям:

$$\bar{t}_1 = \frac{1}{\Lambda}; \quad \bar{P}(t) = e^{-\Lambda t}. \quad (4)$$

Как следует из анализа выражения (4), чтобы получить ВБР ТС $P = 0,95$ в течение периода выполнения целевой задачи $t_{ЦЗ} = 10$, необходимо провести испытания одного образца ТС в течение суммарного периода $T = 195$ или испытания 20 образцов ТС в течение фиксированного периода $t_{ЦЗ} = 10$ при условии отсутствия внезапных отказов (при $m = 0$). Если будет даже один отказ, то потребуются провести испытания в течение периода $T = 390$ или 39 образцов ТС в течение периодов $t_{ЦЗ}$ соответственно. Для этого могут потребоваться значительные затраты.

Оценивание вероятности безотказной работы ТС. Если вид распределения моментов отказов ТС не соответствует экспоненциальному и неизвестен, то можно непосредственно оценить ВБР ТС $P(t)$ в течение фиксированного периода t , например периода выполнения целевой задачи. Для этого проводятся испытания или эксплуатация нескольких n образцов ТС в штатных условиях при одинаковых периодах t , при которых регистрируется число m внезапных отказов ТС. Несмещенная оценка ВБР ТС и ее СКО определяются по МНО [7] по зависимостям:

$$\bar{P}(t_{ЦЗ}) = \frac{(n+1-m)}{(n+2)}; \quad \sigma_{\bar{P}(t_{ЦЗ})}^2 = \frac{(m+1) \cdot (n+1-m)}{(n+2)^2 \cdot (n+3)}. \quad (5)$$

Как следует из выражения (5), чтобы получить оценку ВБР ТС $P(t_{ЦЗ}) = 0,95$, необходимо провести испытания $n = 18$ образцов ТС или $n = 18$ испытаний восстанавливаемого образца ТС в течение периодов $t_{ЦЗ}$, если не будет отказов (при $m = 0$). Если возникнет хотя бы один отказ ($m = 1$), понадобится увеличить число испытаний до $n = 38$. Таким образом, оценивание ВБР ТС связано со значительными технико-экономическими затратами.

Если полномасштабные испытания ТС осуществить не удастся, то ВБР ТС можно определить по результатам наземных испытаний подсистем на основе моделей структурных схем надежности (ССН), которые показаны на рис. 2 [8].

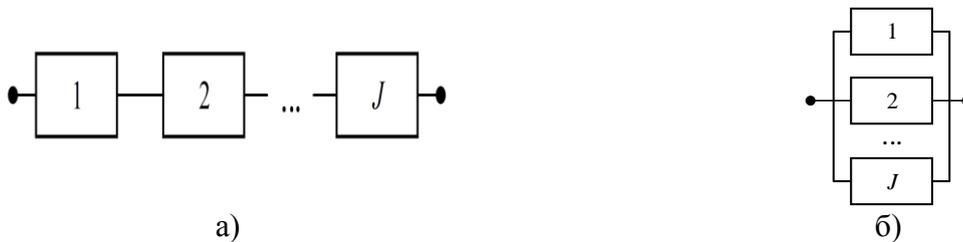


Рис. 2. Простейшие структурные схемы надежности ТС:
а – нерезервированная; б – резервированная с нагруженными резервами

Если ТС состоит из J подсистем без резервирования и для каждой j -й подсистемы получены оценки ВБР $P_j(t)$, то оценка ВБР ТС определяется на основе ССН (рис. 2,а) по зависимости

$$\bar{P}_{ТС}(t) = \prod_{j=1}^J \bar{P}_j(t). \quad (6)$$

Из выражения (6) следует, что для достижения высокой ВБР ТС без резервирования необходимо обеспечить еще более высокие ВБР каждой подсистемы. Например, чтобы достичь ВБР ТС $P_{ТС}(t) = 0,95$ с $J = 5$ подсистемами, необходимо иметь уровень ВБР каждой подсистемы $P_j(t) = 0,99$.

Если подсистемы имеют невысокие ВБР, то для обеспечения необходимой ВБР ТС можно использовать резервирование. При нагруженном резервировании (ССН на рис. 2,б) оценка ВБР ТС определяется на основе ВБР подсистем по зависимости

$$\bar{P}_{\text{ТС}}(t) = 1 - \prod_{j=1}^J [1 - \bar{P}_j(t)]. \quad (7)$$

При резервировании ТС ВБР существенно возрастает. Например, чтобы достичь ВБР ТС $P_{\text{ТС}}(t) = 0,95$ с $J = 3$ подсистемами, достаточно обеспечить уровень ВБР подсистем всего $P_j(t) = 0,63$.

На основе оценок ВБР ТС можно определить оценки других показателей безотказности ТС. Если получена оценка функции $P_{\text{ТС}}(t)$, то оценки средней наработки между отказами и переменной ИО ТС определяются по методу линеаризации:

$$\bar{t}_1 = \int_0^{\infty} \bar{P}_{\text{ТС}}(t) dt; \quad \bar{\Lambda}_{\text{ТС}}(t) = \frac{d[1 - \bar{P}_{\text{ТС}}(t)]}{dt} / \bar{P}_{\text{ТС}}(t). \quad (8)$$

При контроле безотказности ТС следует учитывать, что для обеспечения и подтверждения высокой ВБР ТС проведение большого объема натуральных испытаний или резервирование современных сложных ТС значительно ограничено технико-экономическими возможностями. Часто проводится только ограниченное число демонстрационных испытаний ТС для подтверждения способности ТС реально функционировать. Поэтому в последнее время большое внимание уделяется методам объединения информации о безотказности и параметрической надежности ТС, а также методам их оценивания.

3.2. Оценивание вероятности параметрической надежности ТС

Вероятность параметрической надежности (ВПН) ТС зависит от числа и характера параметров состояния, а также от допустимых пределов, установленных для ПС. Оценки ВПН ТС можно определить на основе экспериментальных данных для каждого ПС и для совокупности ПС.

Оценивание вероятности параметрической надежности ТС по каждому параметру состояния. Отдельные параметры состояния ТС обычно являются случайными величинами или случайными процессами. Поэтому для контроля ПН ТС необходимо знать распределения случайных ПС. Рассмотрим наиболее простой случай, когда отдельный ПС x является случайной величиной. Распределение ПС в момент t представим в виде плотности вероятности (ПВ) $f(x)$. Часто ПС имеют нормальное распределение, ПВ которого зависит от математического ожидания (МО) M и среднеквадратического отклонения (СКО) σ [9]:

$$f(x) = (2\pi)^{-0,5} \sigma^{-1} e^{-0,5\sigma^{-2}(x-M)^2}. \quad (9)$$

Если распределение ПС неизвестно, его можно определить по экспериментальным данным. Для этого необходимо провести n независимых экспериментов в одинаковых условиях, соответствующих условиям эксплуатации ТС, и зафиксировать реализации ПС x_i , $i = 1, \dots, n$. Вид и параметры распределения ПС определяются статистическими методами [9]. Если ПС имеет нормальное распределение с ПВ (9), то оценки МО и СКО определяются по известным зависимостям [9]:

$$\bar{M} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; \quad \bar{\sigma}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - M)^2. \quad (10)$$

Предположим, что для ПС заданы стабильные допустимые пределы A и B . При этом оценка вероятности параметрической надежности $P_{\text{ПН}}$ по одному нормально распределенному ПС определяется как вероятность нахождения ПС в допустимых пределах:

$$\bar{P}_{\text{ПН}} = \int_A^B \bar{f}(x) dx, \quad (11)$$

где $\bar{f}(x)$ – оценка ПВ (9) при оценках параметров (10).

Достоинство ПН состоит в том, что можно обеспечить высокую ВПН на основе регулирования уровней ПС и назначения соответствующих пределов для ПС. Для этого достаточно

обеспечить, чтобы ПС почти наверняка не выходил за допустимые пределы. Рассмотрим стабильный нормально распределенный ПС с МО $M = 80$ и СКО $\sigma = 3$. Заданы допустимые пределы для ПС $A = 70$, $B = 100$, как показано на рис. 3. В этом случае по зависимости (11) получается высокая ВПН ТС $P_{\text{ПН}} = 0,9996$.

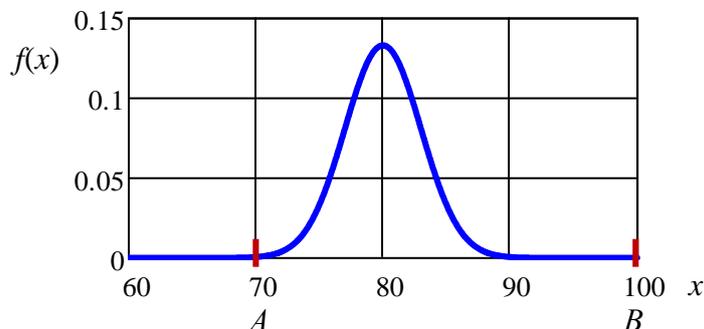


Рис. 3. Плотность вероятности ПС и допустимые пределы

При определении ВПН ТС основные трудности возникают из-за необходимости выбора распределения случайных ПС. Наиболее достоверно распределение ПС определяется по экспериментальным данным. Если даже известно, что ПС имеет нормальное распределение, для достоверного оценивания МО и СКО по зависимостям (10) необходимо провести несколько десятков экспериментов. Если при этом МО и СКО ПС могут изменяться в процессе работы ТС, то число экспериментов необходимо еще многократно увеличить, для чего могут потребоваться значительные затраты.

Допустимые пределы для ПС также могут быть случайными величинами, как, например, при определении ВПН ТС по модели «нагрузка-прочность». В этом случае для определения ВПН необходимо дополнительно оценить ПВ $f(B)$ возможного изменения показателя прочности B . Параметрическая надежность ТС обеспечивается, если нагрузка в виде ПС x не превышает значения показателя прочности B , который может варьироваться в пределах $B \in [B_{\min}; B_{\max}]$. При этом оценка ВПН ТС вычисляется по зависимости [7]

$$\bar{P}_{\text{ПН}} = \int_{B_{\min} - \infty}^{B_{\max}} \int_{-\infty}^B \bar{f}(x) \cdot \bar{f}(B) dx dB. \quad (12)$$

При определенных соотношениях распределений ПС x и показателя B можно обеспечить высокую ВПН. Рассмотрим вариант, когда нагрузка в виде ПС x имеет нормальное распределение с МО $M = 80$ и СКО $\sigma = 3$, а показатель прочности B распределен нормально с МО $M_B = 100$ и СКО $\sigma_B = 5$. При этом по зависимости (11) получается высокая ВПН $P_{\text{ПН}} = 0,9997$.

В ряде случаев экстремальные значения ПС ТС могут быть формально связаны с безотказностью ТС. Например, давление в камере сгорания ракетного двигателя как ПС должно находиться в заданных пределах. Возможность этого характеризуется вероятностью параметрической надежности. Незначительный выход давления за допустимые пределы еще не приводит к отказу двигателя. Однако при предельных значениях давления $p \rightarrow 0$ или $p \rightarrow \infty$ происходит прекращение работы двигателя (остановка или взрыв), т. е. как физический внезапный отказ. При этом ПН формально совпадает с безотказностью, а вероятности ВПН и ВБР в результате отказа равны: $P_{\text{ДВ}} = P_{\text{ПН}} = 0$. Аналогично возможна формальная связь с безотказностью ТС параметров состояния в виде электрического тока или температуры. Однако такие случаи не означают, что параметрический отказ приводит к физическому отказу ТС. Причинами таких отказов могут быть возможные скрытые дефекты, не выявленные при отработке ТС, которые инициируют скачки ПС до критических значений. При этом динамика ПС может указать пути для поиска непосредственных причин физических отказов ТС.

Оценивание вероятности параметрической надежности ТС по совокупности параметров состояния. Рассмотрим отдельные ПС ТС $x_j, j = 1, \dots, J$ в некоторый момент t . Они образуют вектор ПС ТС $X = \{x_j\}$, от которого зависит параметрическая надежность ТС. Если ПС переменны во времени, то для определения ВПН ТС по всем ПС необходимо иметь распределение вектора ПС $X = \{x_j\}$ в каждый момент времени t в виде многомерной плотности вероятностей ПВ $f(X/t)$.

Для обеспечения ПН все ПС ТС должны соответствовать определенным условиям, которые обычно задаются в виде совокупности допустимых пределов. Рассмотрим стабильные допустимые пределы для каждого ПС в виде $\{A_j; B_j\}$, которые образуют допустимое множество Ω_B для вектора ПС X . В этом случае ВПН ТС по всем ПС вычисляется по зависимости

$$P_{\text{ПНТС}}(t) = \oint_{\Omega_B} f(X/t) dx_1 dx_2 \dots dx_j. \quad (13)$$

Вычисления по зависимости (13) значительно упрощаются, если ПС $\{x_j\}$ взаимно независимы. При этом по зависимости (11) можно определить оценку ВПН $P_{\text{ПН}j}(t), j = 1, \dots, J$, по каждому ПС в момент t :

$$\bar{P}_{\text{ПН}j}(t) = \int_{A_j}^{B_j} \bar{f}(x_j / t) dx_j, \quad j=1, \dots, J. \quad (14)$$

Оценка вероятности параметрической надежности ТС определяется на основе произведения вероятностей (14):

$$\bar{P}_{\text{ПНТС}}(t) = \prod_{j=1}^J \bar{P}_{\text{ПН}j}(t). \quad (15)$$

Для достижения высокой ВПН ТС при значительном числе ПС в соответствии с зависимостью (15) необходимо обеспечить очень высокие ВПН по каждому ПС. Если это не удается, то в работе [6] предлагается использовать резервирование и определять ВПН ТС на основе соответствующей модели ССН, простейший вариант которой представлен на рис. 2,б. Однако в области параметрической надежности резервирование ТС невозможно вследствие разнородности ПС, например, по давлению и температуре. Резервирование возможно только в редких случаях, когда один и тот же ПС ТС характеризует работоспособность разных подсистем. Например, требуемую температуру могут поддерживать подсистемы воздушного, водяного или электрического регулирования (охлаждения или нагревания). В этом случае при нагруженном резервировании можно обеспечить высокую ВПН ТС по температуре даже при низких значениях ВПН каждой подсистемы, используя ССН, как на рис. 2,б.

Для определения ВПН ТС могут использоваться только такие ПС, которые удастся непосредственно контролировать или определять по косвенным измерениям. Однако на ПН ТС могут оказывать влияние не только известные контролируемые ПС, но и возможные скрытые неконтролируемые ПС, которые, однако, могут привести к снижению ПН ТС. Например, на надежность и качество работы РДТТ влияют основные ПС – давление и температура в камере сгорания. Эти ПС зависят от состава и плотности заряда твердого топлива, значения их в каждой локальной области заряда, от профиля и площади поверхности заряда в процессе его горения, от размеров возможных трещин заряда и распространения их в массе заряда и др. Такие ПС могут влиять на ПН двигателя в период работы, но они не поддаются контролю и поэтому не учитываются при определении ВПН двигателя.

Если имеется J_2 существенных ПС, а удастся контролировать только J ПС, то ВПН ТС при взаимно независимых ПС определяется в соответствии с выражением (15) по следующей формуле:

$$P_{\text{ПНТС}}(t) = P_{\text{ПНТСК}}(t) \cdot P_{\text{ПНТСН}}(t), \quad (16)$$

где $P_{\text{ПНТСК}}(t)$ и $P_{\text{ПНТСН}}(t)$ – ВПН ТС по контролируемым и неконтролируемым ПС, которые определяются формулами:

$$P_{\text{ПНТСК}}(t) = \prod_{j=1}^J P_{\text{ПН}j}(t); \quad P_{\text{ПНТСН}}(t) = \prod_{j=J+1}^{J_s} P_{\text{ПН}j}(t). \quad (17)$$

Так как значение $P_{\text{ПНТСН}}(t)$ не удается определить, в то же время неконтролируемые ПС могут быть связаны со скрытыми дефектами и привести к внезапным отказам, то второй сомножитель в зависимости (16) можно рассматривать как ВБР ТС вследствие наличия возможных скрытых дефектов.

Из рассмотрения формулы (16) следует, что оценка ВПН ТС, определяемая по зависимостям (13) или (15) с учетом только основных контролируемых ПС, всегда смещена в большую сторону по сравнению с действительной. Это может привести к снижению достоверности соответствия безотказности ТС требованиям по значению ВПН.

Таким образом, анализ показателей безотказности ТС в разделах 2 и 3 свидетельствует, что безотказность и параметрическая надежность отражают разные стороны общей безотказности ТС. Их различия по некоторым показателям приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Анализ основных характеристик показателей безотказности
и параметрической надежности ТС**

№ п/п	Показатели	Свойства ТС	
		Безотказность (по внезапным отказам)	Параметрическая надежность
1	Требуемые функции в соответствии с ГОСТ [4, 5]	Безотказная работа	Допустимые значения ПС
2	Характер возможных отказов	Внезапные отказы	Параметрические отказы (постепенные и внезапные)
3	Критерии выполнения требуемых функций	Отсутствие внезапных отказов	Нахождение ПС в допустимых пределах
4	Прогнозирование возможных отказов	Для каждого образца ТС невозможно	Возможно для каждого образца ТС
5	Возможность работы ТС после отказа	Полностью прекращается	Работа с пониженным качеством
6	Показатели безотказности ТС	ВБР, ИО, наработка между отказами	Вероятность параметрической надежности
7	Область использования показателей безотказности	Только для совокупности образцов ТС	Для каждого образца ТС
8	Экспериментальные данные для оценок показателей безотказности	Число и моменты внезапных отказов	Число и значения ПС
9	Возможность достижения высоких показателей безотказности	Ограничена	Высокая
10	Трудоемкость оценивания показателей безотказности	Высокая	Ограничена

Приведенные данные подтверждают, что безотказность ТС с учетом внезапных отказов и параметрическая надежность ТС – это принципиально разные свойства, которые характеризуют общую безотказность ТС. Поэтому при оценивании и контроле безотказности ТС необходимо учитывать как безотказность по внезапным отказам, так и параметрическую надежность.

4. ОЦЕНИВАНИЕ УРОВНЯ ОБЩЕЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ ТС

Для достижения высокого уровня общей безотказности ТС необходимо обеспечить и безотказность по внезапным отказам, и параметрическую надежность ТС. При этом параметрическая надежность ТС может рассматриваться только при условии физического функционирования ТС. Поэтому полную вероятность безотказной работы (ПВБР) ТС $P_{\text{ПВБР}}(t)$ можно оценить на основе произведения оценок ВБР, которая определяется по зависимостям (6) или (7), и условной ВПН по зависимости (15):

$$\bar{P}_{\text{БТС}}(t) = \bar{P}_{\text{ТС}}(t) \cdot \bar{P}_{\text{ПНТС}}(t). \quad (18)$$

Если ВБР $P_{\text{ТС}}(t) = 1$, то ПВБР ТС совпадает с ВПН. Если ВБР ТС невысокая, то какая бы ни была ВПН, общая ВБР ТС не может быть выше ВБР. Поэтому параметрическая надежность не может выступать в качестве полной безотказности ТС. Какой бы высокой ни была ВПН ТС, случайные отказы функционирования ТС всегда возможны. Например, допустим, что ВПН ТС $P_{\text{ПНТС}}(t) = 1$. Если моменты случайных отказов ТС имеют экспоненциальное распределение, то ТС имеет некоторую постоянную, но ненулевую интенсивность отказов (ИО) λ . При этом ВБР ТС определяется по второй зависимости (4). Из этого следует, что даже при невысокой ИО ТС всегда может отказать, возможно, при большом периоде работы. Следовательно, оценку общей ВБР ТС необходимо определять только по зависимости (18) с учетом возможности внезапных отказов ТС.

Значение ВБР ТС можно достоверно определить только на основе достаточного объема автономных, комплексных или полномасштабных испытаний. Для этого требуются значительные технико-экономические затраты. На сегодняшний день в условиях ограниченных ресурсов объемы натуральных испытаний современных сложных ТС значительно сокращены. При этом принятие ТС в эксплуатацию производится на основе информации о безотказности аналогов ТС и (или) контроля только параметрической надежности, уровень которой можно определить на основе контроля ПС при лабораторных исследованиях или автономных испытаниях подсистем. Для этого обычно не требуются значительные затраты. Однако параметры состояния в общем случае изменяются в процессе работы ТС и на протяжении жизненного цикла ТС. Вместе с тем для определения видов и параметров распределений случайных ПС и ВПН ТС необходимо получить значительный объем экспериментальных данных, что связано с дополнительными затратами. Поэтому определение вероятности параметрической надежности ТС также может оказаться трудоемким.

Кроме того, для определения ВПН могут использоваться только такие основные ПС, которые можно непосредственно контролировать или определять по косвенным измерениям. Однако на уровень параметрической надежности ТС могут оказывать влияние также скрытые ПС, которые можно предполагать, но невозможно контролировать. Как показано в разделе 3, действительная ВПН ТС может оказаться ниже по сравнению с оценкой ВПН, полученной по зависимости (15). Поэтому контроль вероятности безотказной работы ТС на основе оценки выражения (18) может повлиять на достоверность решения о принятии ТС в эксплуатацию и привести к дополнительным расходам для выявления и устранения возможных скрытых дефектов в процессе эксплуатации ТС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На базе проведенных исследований получены следующие основные выводы.

Безотказность ТС, характеризующая возможность внезапных отказов, принципиально отличается от параметрической надежности, которая зависит от параметров состояния ТС.

Для контроля безотказности ТС целесообразно учитывать полную вероятность безотказной работы ТС, включающую вероятность внезапных отказов и параметрическую надежность.

Список используемых источников

1. Надежность и эффективность в технике : справочник : в 10 т. / под ред. Р. С. Судакова. – М. , Машиностроение. – Т. 6 : Экспериментальная отработка и испытания. – 1989. – 376 с.
2. Анализ способов статистического контроля безотказности технических систем одноразового использования / А. В. Букасов [и др.] // Стратегическая стабильность. – 2021. – № 1(94). – С. 71–78.
3. *Похабов Ю. П.* О дефиниции термина «надежность» // Надежность. – 2017. – Т. 17, № 1(60). – С. 4–10.
4. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике : Термины и определения : [введ. 2017-03-01]. – М. : Стандартинформ, 2016. – 22 с.
5. ГОСТ Р 27.102-2021. Надежность в технике. Надежность объекта : Термины и определения : [введ. 2022-01-01]. – М. : Стандартинформ, 2021. – 46 с.
6. *Проников А. С.* Параметрическая надежность машин. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 560 с.
7. *Сухорученков Б. И.* Анализ малой выборки : Прикладные статистические методы. – М. : Вузовская книга, 2010. – 382 с.
8. ГОСТ Р МЭК 61078-2021. Надежность в технике : Структурная схема надежности : [введ. 2022-01-01]. – М. : Стандартинформ, 2021. – 98 с.
9. Вероятность и математическая статистика : энцикл. / под ред. Ю. В. Прохорова. – Репр. изд. – М. : Большая Рос. энцикл., 2003. – 912 с.

А. Б. Ревяков,
кандидат технических наук, доцент;
Н. В. Рыжий,
кандидат технических наук

АНАЛИЗ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ОБЪЕКТАМИ НАЗЕМНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Статья посвящена проблеме сбора, обработки и анализа исходной информации о потреблении электрической энергии объектами наземной космической инфраструктуры, необходимой для контроля ее рационального потребления и расчета технических ее потерь в системе электроснабжения. Разработана методика проведения анализа потребления электрической энергии, характерной чертой которой является определение вклада каждого ввода, оснащенного счетчиком электроэнергии, в общее потребление электроэнергии объектами наземной космической инфраструктуры. Проведена апробация данной методики на примере потребления электроэнергии объектами ракетно-космического комплекса «Союз-2».

Ключевые слова: система электроснабжения, потребление электроэнергии, потери электроэнергии, годовой график энергопотребления, динамический ряд, метод наименьших квадратов, метод сезонных показателей.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одними из актуальных задач эксплуатации и развития систем электроснабжения (СЭС) объектов наземной космической инфраструктуры (ОНКИ) являются контроль рационального потребления и определение технических потерь электроэнергии [1]. Для решения данных задач необходимо с достаточной точностью определять устоявшееся за много лет годовое потребление электроэнергии, а также выявлять очаги сверхнормативных значений ее потребления.

При осуществлении контроля рационального потребления электроэнергии необходимо обращать внимание на факты сверхнормативного потребления электроэнергии. Данные факты можно выявлять как при проведении контрольно-профилактических мероприятий энергонадзора на ОНКИ, так и при анализе их графиков месячного потребления электроэнергии. Во втором случае актуально построение годовых графиков устоявшегося за несколько лет ежемесячного потребления электроэнергии.

Анализ технических потерь электроэнергии требует наличия достоверной информации о годовом потреблении электроэнергии. Стандартный подход к определению годового потребления электроэнергии ОНКИ основан на использовании типовых суточных графиков электрических нагрузок и числа часов наибольших потерь [2]. Использование такого рода исходной информации основано на допущении о схожести характеристик энергопотребления ОНКИ и типовых объектов промышленного и коммунально-жилищного назначения. Для определения годового энергопотребления такого рода исходная информация является мало достоверной, так как не учитывает специфику функционирования ОНКИ.

На сегодняшний день источниками наиболее достоверной информации о потреблении электроэнергии ОНКИ являются приборы коммерческого учета электроэнергии, установленные практически на каждом вводе 0,4 кВ. Данные приборы функционируют с 2015 года и представляют собой современные цифровые счетчики электроэнергии, способные хранить в себе информацию о пофазном потреблении как активной, так и реактивной электроэнергии. Хранение ретроспективной информации о потреблении электроэнергии в данных счетчиках осуществляется в так называемых журналах событий. В таких журналах запись ретроспективной информации осуществляется с шагом дискретизации в 30 мин, при этом сроки ее хранения могут достигать 10 лет.

Кроме того, современные цифровые счетчики электроэнергии способны фиксировать дополнительное потребление электроэнергии потребителями с нелинейной вольт-амперной характеристикой, которые в последнее время нашли широкое применение среди потребителей ОНКИ.

С учетом преимуществ современных счетчиков электроэнергии актуально проведение анализа потребления электроэнергии ОНКИ по исходным данным, фиксируемым счетчиками электроэнергии. В настоящей статье представлен анализ энергопотребления ОНКИ по исходным данным о ежемесячном потреблении электроэнергии сооружениями ракетно-космического комплекса (РКК) «Союз-2» (космодром Плесецк) за последние 5 лет. Вместе с тем решены следующие задачи:

- определен вклад потребителей РКК, оснащенных счетчиками электроэнергии, в общее потребление электроэнергии рассматриваемого РКК;
- построена расчетная схема потребления электроэнергии РКК;
- определены годовые графики потребления электроэнергии.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВКЛАДА ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ОБЪЕКТОВ НАЗЕМНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ В ОБЩЕЕ ПОТРЕБЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НАЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Для проведения анализа потребления электроэнергии потребителями ОНКИ целесообразно ввести понятие объекта потребления. *Объект потребления* – это совокупность приемников электроэнергии, входящих в состав наземного космического комплекса (НKK), энергопотребление которых фиксируется отдельными счетчиками электроэнергии.

Рассмотрим исходные данные об объектах потребления РКК «Союз-2», расположенного на территории 1-го государственного испытательного космодрома Плесецк (площадь 43). На сегодняшний день по актам разграничения балансовой принадлежности сторон к СЭС РКК «Союз-2» подключено 58 сооружений. С учетом наличия у некоторых сооружений РКК двух и более вводов 0,4 кВ общее количество объектов потребления составляет 72 объекта.

Введем понятие *исходного множества объектов потребления* $\Theta^* = \{\theta_h^*\}$, $h = 1, 2, \dots, H^*$, где H^* – общее их количество в исходном множестве. Ретроспективная информация о потреблении электроэнергии в данном случае будет представлять собой совокупность исходных данных $\Omega_{(-)}^* = [W_{hg(-)}^*]$, $g(-) = 1, 2, \dots, G(-)$, где $g(-)$ и $G(-)$ – номер шага дискретизации $\Delta t_{(-)}$ и их общее количество, формирующие период основания ретроспективной информации, $W_{hg(-)}^*$ – электроэнергия, потребленная h -м объектом потребления из исходного множества Θ^* в $g(-)$ -м шаге дискретизации периода основания ретроспективной информации, кВА·ч.

Как указано выше, установленные на ОНКИ счетчики электроэнергии могут хранить в себе информацию о потреблении электроэнергии с шагом дискретизации $\Delta t_{(-)} = 30$ мин. Однако на сегодняшний день снятие такого рода ретроспективной информации со счетчиков электроэнергии не осуществляется. Вместо этого снятие показаний счетчиков происходит каждый месяц $\Delta t_{(-)} = 1$ мес. для коммерческого расчета потребления электроэнергии.

Как известно [2], НKK могут отличаться друг от друга значительной величиной потребления электроэнергии. Вследствие значительного разброса потребления электроэнергии в составе НKK могут находиться объекты с незначительным потреблением электроэнергии по сравнению с суммарным расходом электроэнергии НKK в целом. Из-за малого вклада таких объектов в годовое энергопотребление НKK потери электроэнергии в их питающих

линиях 0,4 кВ также будут незначительными. Это приводит к малой эффективности проведения мероприятий, связанных с реконструкцией конкретных линий, питающих объекты с незначительным потреблением электроэнергии, установкой компенсирующих устройств на их вводах 0,4 кВ или проведением других мероприятий по снижению потерь, область применения которых распространяется только на объекты с незначительным потреблением электроэнергии. В данном случае мероприятия по снижению потерь в СЭС таких объектов целесообразно рассматривать только в совокупности с мероприятиями для других объектов потребления, суммарный вклад которых в годовое потребление НКК имеет более существенное значение.

Для того чтобы выявить объекты с незначительным потреблением электроэнергии, воспользуемся предположением академика Б. В. Гнеденко и инженера Б. С. Мешеля, которое они выдвинули при разработке *статистического метода* расчета электрических нагрузок. Оно свидетельствует, что изменение электрических нагрузок в узле СЭС случайно и подчинено нормальному закону распределения, если в ее создании постоянно участвуют не меньше восьми электроприемников [3].

Взяв за основу данное предположение, определим *объекты со значительным потреблением электроэнергии* как объекты, в потреблении электроэнергии которых постоянно участвует такое количество электроприемников, чтобы можно было доказать, что они имеют суммарное потребление электроэнергии, случайная составляющая изменения которой в течение года соответствует нормальному закону распределения. В противном случае, если это доказать будет трудно, то мы имеем дело с объектами с незначительным потреблением электроэнергии.

Для того чтобы выявить объекты с незначительным потреблением электроэнергии, на первоначальных этапах проведения анализа можно не проводить статистический анализ ретроспективных данных о потреблении электроэнергии для всех объектов потребления. Вместо этого на их основе можно будет осуществить следующее.

1. Рассчитать вклад каждого объекта потребления из исходного множества Θ^* в общее потребление электроэнергии рассматриваемого НКК:

$$\gamma_h^* = 100\% \cdot \frac{W_{h(-)}^*}{W_{(-)}^*} = 100\% \cdot \frac{\sum_{g(-)=1}^{G(-)} W_{hg(-)}^*}{\sum_{h=1}^{H^*} \sum_{g(-)=1}^{G(-)} W_{hg(-)}^*}, \quad (1)$$

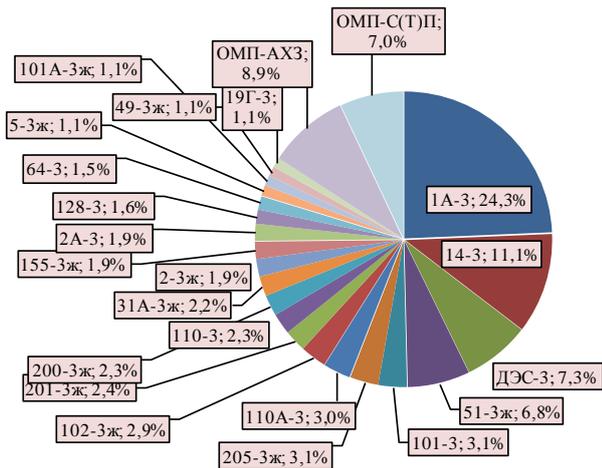
где $W_{h(-)}^*$ и $W_{(-)}^*$ – потребление электроэнергии h -м объектом и всеми объектами потребления исходного множества Θ^* за весь период основания ретроспективной информации, кВА ч.

2. Задать некое правило группировки объектов потребления. Например, по вкладу в общее потребление электроэнергии объекты потребления рассматриваемого НКК можно распределить по группам объектов:

- большого ($\gamma_h^* \geq 5\%$) потребления электроэнергии;
- среднего ($1 \leq \gamma_h^* < 5\%$);
- малого ($\gamma_h^* < 1\%$).

3. Провести проверку случайной составляющей графика потребления на предмет соответствия нормальному закону распределения случайной величины и при необходимости изменить правило группировки объектов малого потребления электроэнергии.

Результаты расчета вклада каждого объекта потребления в общее потребление РКК «Союз-2» представлены на рис. 1.

**Условные обозначения:**

1А-3 – стартовое сооружение; 14-3 – монтажно-испытательный корпус;
 ДЭС-3 – дизельная электростанция; 51-3ж – котельная; 201-3ж – казарма;
 101-3 – компрессорная станция; 205-3ж – насосная станция 3 подъема;
 110А-3 – прочие здания и сооружения; 102-3ж – солдатская столовая;
 110-3 – спецсооружение; 200-3ж – казарма;
 31А-3ж – гараж; 2-3ж – штаб; 155-3ж – канализационно-насосная станция;
 2А-3 – универсальный командный пункт; 128-3 – насосная проточка;
 64-3 – склад; 5-3ж – канализационно-насосная станция; 101А-3ж – офицерская столовая; 49-3ж – скважина № 5;
 19Г-3 – спецсооружение;
 ОМП-АЖФ – объекты малого потребления АХЗ; ОМП-С(Т)П – объекты малого потребления стартовой и технической позиции.

Рис. 1. Структура потребления электроэнергии объектами РКК «Союз-2»

В РКК «Союз-2» (рис. 1) объекты большого потребления электроэнергии (ОБП) находятся в четырех сооружениях: стартовом сооружении (24,3%), монтажно-испытательном комплексе (11,1%), дизельной электростанции (7,3%) и котельной (6,7%). Суммарная доля потребления ОБП составляет практически половину общего количества потребляемой электроэнергии объектами РКК (49,4%).

Объекты среднего потребления электроэнергии (ОСП) находятся в сооружениях системы теплоснабжения и водоснабжения РКК, административно-хозяйственной зоне, а также в дополнительных спецсооружениях технической и стартовой позиции. Всего в РКК «Союз-2» 18 сооружений с ОСП.

Объекты малого потребления (ОМП) находятся в сооружениях малого строительного объема, в состав потребителей которых входит незначительное количество электроприемников. В РКК «Союз-2» данные сооружения являются самыми многочисленными и их общее количество составляет 36 сооружений. Данные сооружения характеризуются редким включением нагрузки в работу, в основном это объекты «разового использования», которые выполняют функцию временных укрытий или складов.

РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ОБЪЕКТАМИ НАЗЕМНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Расчетная схема потребления электроэнергии представляет собой графическое отображение распределения электроэнергии, потребленной ОНКИ, по элементам СЭС НКК. Она может использоваться для следующих операций

- разработки математической модели энергопотребления НКК и технических потерь электроэнергии в элементах его СЭС и СЭС в целом;
- выявления неравномерного распределения потребления электроэнергии между элементами СЭС НКК, а также выявления среди них незагруженных и потенциально малонагруженных элементов.

При разработке расчетной схемы энергопотребления, руководствуясь правилом группировки ОМП $\gamma_h^* < 1\%$, ОМП, подключенные к отдельному вводу потребительской трансформаторной подстанции (ТП), можно объединить в условный объект потребления электроэнергии так, как это показано на рис. 2.

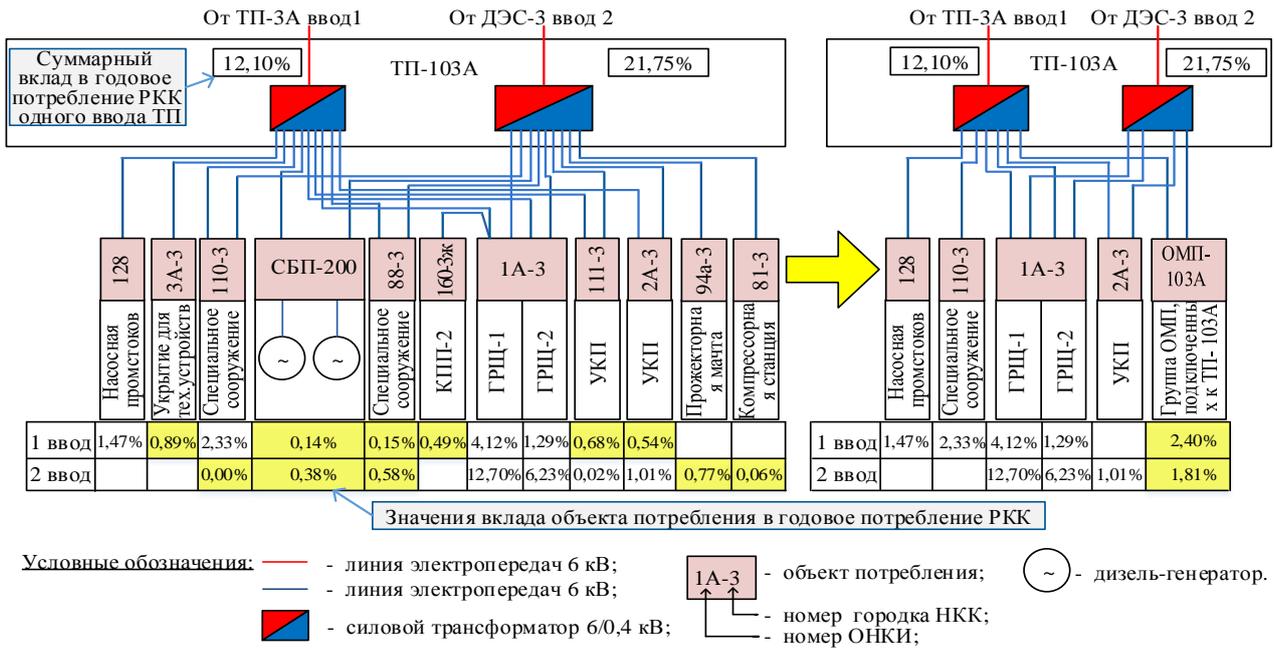


Рис. 2. Группировка объектов малого потребления РКК «Союз-2»

На рис. 2 представлен фрагмент расчетной схемы СЭС РКК «Союз-2», состоящий из ТП 6/0,4 кВ № 103-А, питающих ее линий 6 кВ и отходящих линий 0,4 кВ. На нем показано, что такие объекты РКК «Союз-2», как укрытие для технических устройств, система гарантированного питания стартового сооружения СГЭП-200, специальные сооружения № 88-3 и № 110-3 и универсальные командные пункты № 111-3 и № 2А-3 можно рассматривать в качестве двух объектов потребления «ОМП-103А ввод 1» и «ОМП-103А ввод 2». Причем вклад второго ввода ТП 6/0,4 кВ № 103-А в годовое потребление РКК в 2 раза превышает вклад первого. При планировании реконструкции на данном элементе СЭС необходимо будет осуществить перераспределение потребителей электроэнергии по вводам ТП 6/0,4 кВ № 103-А.

Учитывая, что ОМП среди всех объектов потребления РКК являются весьма многочисленными, их группировка позволила значительно упростить расчетную схему энергопотребления РКК. Таким образом, в упрощенной схеме СЭС РКК «Союз-2», представленной на рисунке 3, общее количество объектов потребления РКК удалось снизить до 41, что практически в 1,7 раза меньше, чем было в исходной схеме потребления электроэнергии (72 объекта).

Анализ, выполненный с помощью расчетной схемы (рис. 3), позволяет сделать вывод, что в СЭС РКК «Союз-2» часто имеет место проблема неравномерного распределения электроэнергии между вводами ТП 6/0,4 кВ. Кроме того, возникает проблема незагруженных и малонагруженных вводов ТП 6/0,4 кВ (ТП-9 – оба ввода, ТП-154 – оба ввода, ТП-10 – 2-й ввод и дизельная электростанция ДЭС-3 – 2-й ввод). В данных элементах СЭС с большой вероятностью может быть обнаружено, что значение потерь холостого хода силовых трансформаторов превышает суммарное значение потребления электроэнергии подключенных к ним объектов РКК. При планировании реконструкции СЭС РКК «Союз-2» данная проблема должна быть решена за счет оптимизации структуры СЭС.

В результате упрощения расчетной схемы потребления НКК формируется множество объектов потребления $\Theta = \{\theta_h\}$, $\Theta \subset \Theta^*$, $h = 1, 2, \dots, H$, где H – общее их количество, а также измененные исходные данные о потреблении электроэнергии $\Omega_{(-)} = [W_{hg(-)}]$, в которых гра-

фики потребления электроэнергии групп ОМП будут составлять сумму графиков потребления электроэнергии входящих в их состав ОМП.

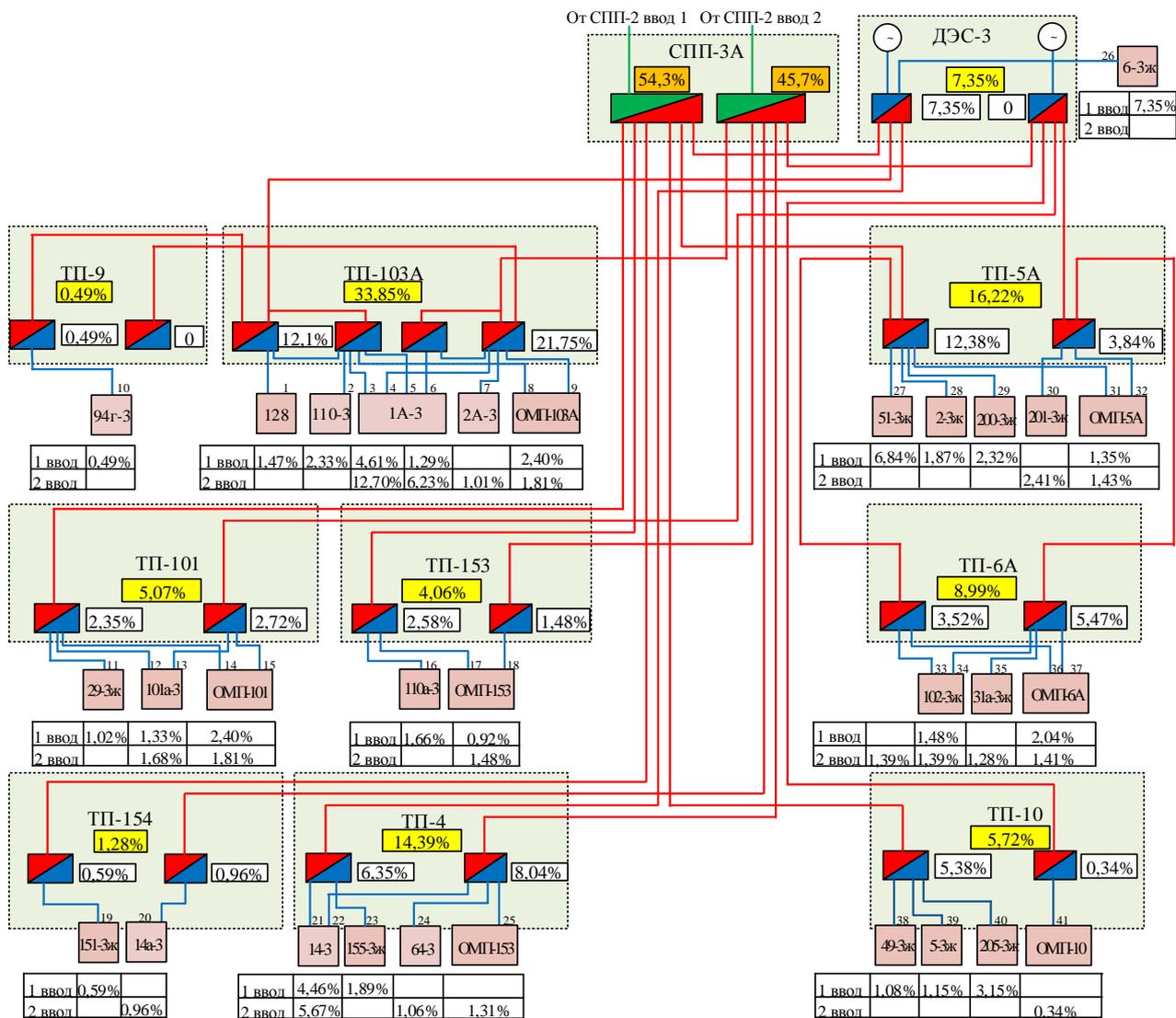


Рис. 3. Расчетная схема потребления электроэнергии объектами РКК «Союз-2»

При расчете технических потерь электроэнергии все линии, питающие группу ОМП, можно будет объединить в одну условную линию 0,4 кВ, для которой рассчитывается эквивалентное сопротивление [3]:

$$R_h = k_h \frac{\sum_{y_h=1}^{Y_h} l_{y_h}}{\sum_{y_h=1}^{Y_h} l_{y_h} f_{y_h}}, \quad (2)$$

где h — номер группы ОМП;
 y_h и Y_h — номер линии 0,4 кВ, питающей конкретный ОМП в h -й группе ОМП, и общее количество линий, питающих рассматриваемую группу ОМП;

- l_{y_h} и f_{y_h} – длина и сечение фазного проводника линии 0,4 кВ, питающей конкретный ОМП в h -й группе ОМП, м и мм²;
- k_h – коэффициент, зависящий от материала токоведущих жил рассматриваемой группы линий, Ом мм² (для медных жил его значение равно 31,3 Ом·мм², для алюминиевых – 18,3 Ом·мм²).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОДОВЫХ ГРАФИКОВ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ОБЪЕКТАМИ НАЗЕМНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Определение годовых графиков потребления электроэнергии ОНКИ необходимо для следующих целей:

- для интервальной оценки годового потребления электроэнергии;
- для выявления сверхнормативных значений потребления и потерь электроэнергии.

В нашем случае под *годовым графиком потребления электроэнергии* будем понимать график устоявшегося за несколько лет ежемесячного потребления электроэнергии с шагом дискретизации в один месяц.

Определение годовых графиков энергопотребления объектами РКК сводится к задаче экстраполяции динамических рядов (графиков), состоящих из выборочных данных о ежемесячном потреблении электроэнергии. Как известно [4], важнейшими этапами экстраполяции динамических рядов являются их подготовка, идентификация, т. е. их разделение на составляющие, а также дальнейшая экстраполяция их составляющих.

Основная задача этапа подготовки динамического ряда – это избавление его от аномальных значений¹ [5]. Аномальные значения графика энергопотребления могут выступать либо в виде пропусков – резкого уменьшения энергопотребления до практически нулевых значений, либо в виде выбросов – резких его увеличений до сверхнормативных значений.

Гипотетически в графиках энергопотребления ОБП и ОСП наличие фактического пропуска ежемесячного потребления электроэнергии маловероятно. Чаще всего пропуски в ретроспективных данных о ежемесячном потреблении электроэнергии являются следствием несвоевременной фиксации показаний счетчиков электроэнергии. У ОМП фактические пропуски ежемесячного потребления электроэнергии могут быть значительны, так как они являются следствием непродолжительных режимов работы их технологического оборудования и технических систем. При объединении графиков потребления ОМП в общий график их группы такого рода пропуски могут быть исключены.

Появление сверхнормативных значений потребления электроэнергии в объектах РКК может быть связано с несвоевременной фиксацией показаний счетчиков электроэнергии, а также с работами по подготовке и проведению пуска РКН. Стоит отметить, что в подготовке и проведении пуска РКН участвует практически одно и то же технологическое оборудование РКК по строго регламентированному графику. В связи с этим можно предположить, что количество электроэнергии, расходуемой на проведение работ по подготовке и пуску РКН, является детерминированной величиной. Для того чтобы определить данное количество электроэнергии, необходимо провести анализ данных о контрольных замерах нагрузки сети, создаваемой технологическим оборудованием РКК во время подготовки и проведения пуска РКН.

На этапе идентификации исходного графика потребления электроэнергии в его составе целесообразно выделить трендовую составляющую, которая является следствием факторов

¹*Аномальные значения* – редкие (несистематические) значения динамического ряда, в которых уровни значительно превышают среднее значение по всему ряду, или те точки, в которых первые разности значительно (в разы) превышают дисперсию ряда [5].

эволюционного характера, сезонную составляющую, которая зависит от факторов осциллятивного характера, а также случайную составляющую (ошибку), которая является следствием множества случайных факторов [4]. Учитывая данное правило, исходный график изменения ежемесячного потребления электроэнергии h -м объектом РКК можно описать с помощью аддитивной модели

$$W_{hg} = W_{hg.тр} + W_{hg.с} \pm \varepsilon_h, \quad g = 1, 2, \dots, G, \quad (3)$$

где g и G – номер месяца периода упреждения годового графика энергопотребления и их общее количество (для годового графика $G = 12$);
 $W_{hg.тр}$, $W_{hg.с}$ и ε_h – трендовая, сезонная и случайная составляющие графика потребления электроэнергии h -м объектом потребления, кВА·ч.

Наличие тренда в графике потребления электроэнергии может быть обосновано постепенным наращиваем или сокращением функций ОНКИ, его переходом на более энергоемкое или, наоборот, на менее энергоемкое оборудование, а также повышением или снижением результативности проведения мероприятий по энергосбережению. В первой итерации идентификации графиков энергопотребления для определения их трендовых составляющих может быть выбран линейный закон изменения тренда

$$W_{hg.тр} = W_{hg.тр.1} + W_{hg.тр.2}g, \quad (4)$$

где $W_{hg.тр.1}$ и $W_{hg.тр.2}$ – коэффициенты линейного уравнения тренда графика потребления электроэнергии h -го объекта потребления, кВА·ч и (кВА·ч) / мес.

Одним из наиболее распространенных методов определения коэффициентов уравнений тренда является метод наименьших квадратов, суть которого наиболее подробно отражена в работах [7–9]. Анализ графиков потребления электроэнергии РКК «Союз-2» показал, что они все практически нестационарны. К тому же, как это показано на рис. 4, могут иметь тенденцию как к увеличению, так и к уменьшению ежемесячного потребления электроэнергии.

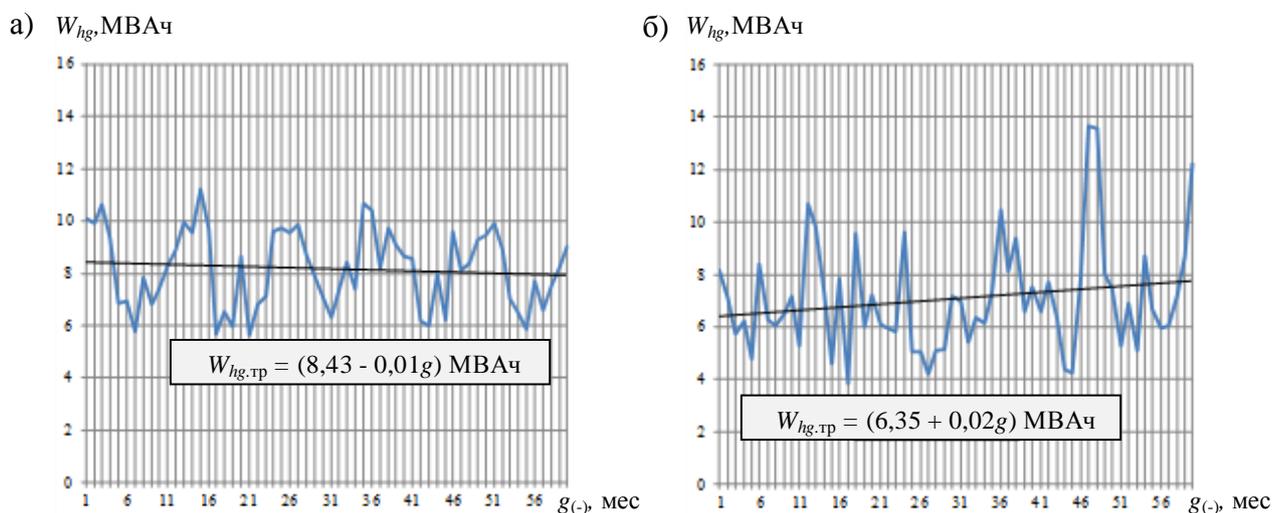


Рис. 4. Трендовые составляющие графика ежемесячного потребления электроэнергии:
 а – объектом потребления «Штаб «Союз-2» (соор.14-3, ГРЦ-1, ввод 1)»;
 б – объектом потребления «МИК «Союз-2» (соор.2-3ж)»

Сезонное изменение потребления электроэнергии может быть обусловлено функционированием технических систем РКК и жизнедеятельностью его личного состава под влиянием сезонного изменения окружающей среды. Для определения сезонного изменения потребления электроэнергии существует множество методов экстраполяции сезонных составляющих динамических рядов, таких как гармонический анализ [7], вейвлет-анализ [10], метод Вин-

терса [11] и т. д. При этом одним из наиболее простых методов экстраполяции сезонных составляющих можно считать *метод сезонных показателей* [5], суть которого заключается в использовании в моделях динамических рядов абсолютных или относительных показателей сезонности.

В аддитивных моделях годовых графиков потребления электроэнергии (3) при известной трендовой составляющей $W_{hg,тр}$ целесообразно применять абсолютный показатель сезонности. Для того чтобы его определить, из исходного графика потребления электроэнергии вычитается трендовая составляющая:

$$W'_{hg(-)} = W_{hg(-)} - W_{hg(-),тр}, \quad (5)$$

где $W'_{hg(-)}$ и $W_{hg(-),тр}$ – значение стационарной и трендовой составляющих ретроспективного графика потребления электроэнергии h -го объекта потребления, кВА·ч.

Затем полученные данные о ежемесячном потреблении электроэнергии распределяются по месяцам одного года $W'_{hg(-)} \rightarrow W'_{hij(-)}$, $i = 1, 2, \dots, 12$, $j(-) = 1, 2, \dots, J(-)$, где i – номер месяца в году, $j(-)$ и $J(-)$ – номер года и общее количество лет периода основания ретроспективной информации. При этом абсолютный показатель сезонности вычисляется как выборочное среднее значение сезонного колебания потребления электроэнергии:

$$W_{hg,c} = \frac{1}{J(-)} \sum_{j(-)=1}^{J(-)} W'_{hij(-)}, \quad \text{при } g = i. \quad (6)$$

Идентификация случайной составляющей графика потребления электроэнергии осуществляется статистическим выборочным методом. Она базируется на предположении о том, что случайная составляющая графика потребления электроэнергии ОБП, ОСП, а также группой ОМП РКК является случайной величиной, которая соответствует нормальному закону распределения с нулевым математическим ожиданием.

Для того чтобы проверить, соответствует ли случайная составляющая графика энергопотребления нормальному закону распределения случайной величины, необходимо использовать эксцесс и асимметрию случайной составляющей [12]. Если их значения удовлетворяют одному из критериев согласия нормального распределения, например критерию χ^2 (критерию согласия Пирсона) или критерию согласия Смирнова – Колмогорова, то можно подтвердить выдвинутое предположение о законе распределения. Если критерий согласия не подтверждается, то можно попробовать увеличить границу правила группировки ОМП для рассматриваемого ввода ТП, например $\gamma_h^* < 2\%$.

При обработке ретроспективной информации о потреблении электроэнергии среднее значение случайной составляющей графика потребления может отличаться от нуля. В этом случае необходимо определить, насколько отличие от нуля среднего значения случайной составляющей графика потребления электроэнергии статистически значимо. Для этого можно использовать статистический t -критерий (критерий Стьюдента).

Методика проведения проверки статистической значимости с помощью критерия Стьюдента подробно изложена в работе [13]. В том случае, если отличие от нуля среднего значения случайной составляющей графика потребления электроэнергии статистически значимо, то необходимо пересмотреть модель годового графика потребления, описанную выражениями (3)–(6).

Для объектов потребления рассматриваемого РКК проверка случайной составляющей графика потребления электроэнергии показала целесообразность использования модели (3)–(6) и правила группировки ОМП $\gamma_h^* < 1\%$ для описания их годовых графиков потребления электроэнергии.

После прохождения проверки можно дать интервальную оценку случайной составляющей графика потребления электроэнергии:

$$\varepsilon_h = t_{\beta, (G_{(-)}-1)} \sqrt{\frac{1}{G_{(-)}-1} \sum_{g_{(-)}=1}^{G_{(-)}} (W_{hg_{(-)}} - W_{hg_{(-)} \cdot \text{TP}} - W_{hg_{(-)} \cdot \text{C}})}, \quad (7)$$

где $t_{\beta, (G_{(-)}-1)}$ – t -критерий (критерий Стьюдента) – значение распределения Стьюдента, соответствующее доверительной вероятности β и степени свободы, равной $G_{(-)}-1$;

$W_{hg_{(-)} \cdot \text{C}}$ – значение сезонной составляющей ретроспективного графика потребления электроэнергии h -м объектом потребления, кВА·ч.

Значение доверительной вероятности β при оценке доверительного интервала в формуле (7), а также при проверке статистической значимости можно принять равным 0,95.

С помощью годового графика энергопотребления и интервальной оценки его случайной составляющей можно будет с заданной точностью определить годовое значение потребления электроэнергии:

$$W_h = \sum_{g=1}^{12} W_{hg} \pm \varepsilon_h, \quad (8)$$

а также можно будет провести анализ рациональности ежемесячного расходования электроэнергии на предмет появления ее сверхнормативных значений.

Пример годового графика потребления электроэнергии одного из вводов монтажно-измерительного комплекса представлен на рис. 5. Данный график разработан на исходных данных об ежемесячном потреблении электроэнергии объектом потребления «МИК «Союз-2» (соор.14, ГРЩ-1, ввод 1)» за последние 5 лет ($J_{(-)} = 5$).

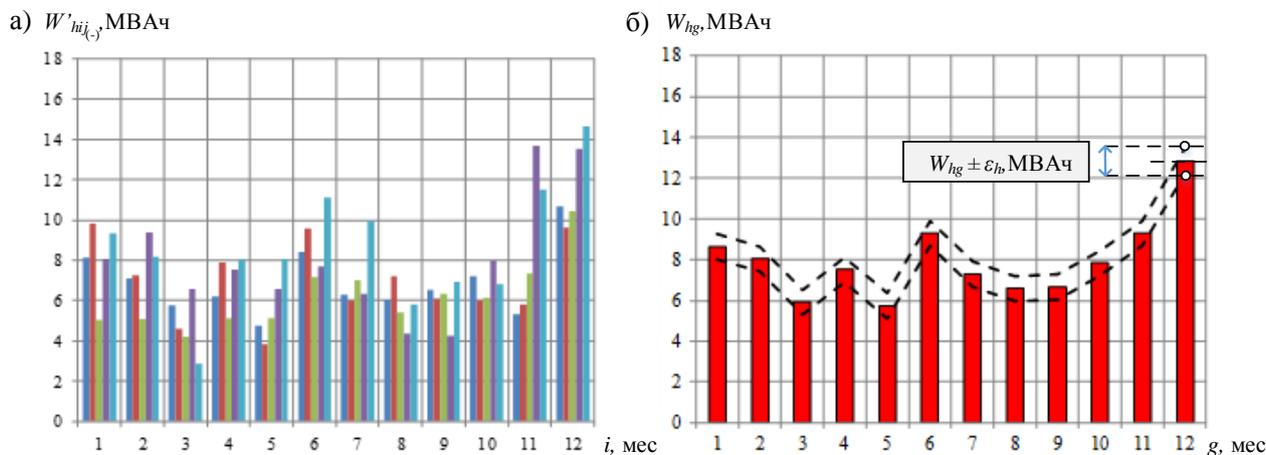


Рис. 5. Определение графика годового потребления электроэнергии объектом потребления «МИК «Союз-2» (соор.14, ГРЩ-1, ввод 1)»:

а – сезонный график изменения ежемесячного потребления электроэнергии;
б – годовой график потребления электроэнергии

Исследования показали, что граница доверительного интервала случайной составляющей большинства годовых графиков потребления электроэнергии объектами РКК «Союз-2» достигает 20% от их средних выборочных значений. Это говорит либо о недостаточном объеме ретроспективных данных для анализа энергопотребления, либо о значительной дисперсии ежемесячного потребления электроэнергии объектами РКК. Для данных объектов потребления повышения точности экстраполяции годовых графиков энергопотребления объектами РКК целесообразно использовать ретроспективную информацию о ежемесячном потреблении электроэнергии с периодом основания более 5 лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, представлен общий подход к проведению анализа потребления электроэнергии ОНКИ, который может применяться в целях контроля потребления электроэнергии ОНКИ и определения технических потерь электроэнергии в их СЭС. Характерными особенностями данного подхода являются:

- использование наиболее достоверной информации о потреблении электроэнергии каждым ОНКИ, фиксируемой современными счетчиками электроэнергии;
- использование вклада каждого ввода 0,4 кВ ОНКИ, оснащенного счетчиком электроэнергии, в общее потребление электроэнергии рассматриваемого НКК;
- построение годовых графиков месячного потребления электроэнергии для каждого ОНКИ.

Использование наиболее достоверной информации о потреблении электроэнергии каждым ОНКИ повышает достоверность проводимых расчетов технических потерь электроэнергии в их СЭС, что позволяет наиболее адекватно оценить эффективность проводимых в них реконструкционных мероприятий. За счет определения вклада каждого ввода можно добиться упрощения расчетной схемы потребления электроэнергии, выявить неравномерное распределение потребления электроэнергии между элементами СЭС НКК, а также среди них – незагруженные и потенциально малонагруженные элементы. Использование годовых графиков месячного потребления электроэнергии позволит выявлять факты нерационального расходования электроэнергии ОНКИ за счет своевременного обнаружения фактов сверхнормативного потребления электроэнергии.

Представленный анализ соответствует специфике потребления электроэнергии ОНКИ, однако может применяться и для других комплексов (объектов), у которых есть объекты с незначительным потреблением электроэнергии.

Список используемых источников

1. Рыжый Н. В., Рыбаков Д. В., Карагодин В. В. Подходы к повышению энергоэффективности систем электроснабжения наземных комплексов // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 663. – С. 126–131.
2. Карагодин В. В., Пешехонов Н. Е., Ревяков Б. А. Проектирование систем электроснабжения объектов специального назначения : учеб. пособие. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2012. – Ч. 2 : Сети до 1000 В. – 176 с.
3. Грачева Е. И., Анисимова Н. В. Прогнозирование потерь в сетях низкого напряжения на основе регрессионного анализа // Вестник ЮУрГУ. Сер. : Силовая энергетика. – № 2, т. 13. – Челябинск, 2013. – С. 19–24.
4. Бокс Дж., Дженскис Г. Анализ временных рядов, прогноз и управление / пер. с англ. А. Л. Левшина. – М. : Мир, 1974. – 605 с.
5. Губанов В. А. Анализ воздействия выбросов на результат сезонной корректировки временных рядов / ИНП РАН. – URL: <https://www.ecfor.ru/publication/vozdjstvia-vybrosov-na-rezultat-korrekcirovki.html> (дата обращения: 28.11.2023).
6. Сазыкин В. Г., Кудряков А. Г. Расчет электрических нагрузок в системах электроснабжения агропромышленного комплекса : мет. указания. – Краснодар : КубГАУ, 2017. – 54 с.
7. Эксплуатация космических средств: теория и практика : учебник : в 2 ч. / Л. Т. Баранов [и др.]; под ред. А. П. Ковалева. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2003. – Ч. 2 : Эксплуатационное качество космических средств. Организация эксплуатации космических средств. – 482 с.

8. *Бабинович Д. Е.* Оптимизация электропотребления на объектах технического водоснабжения (на примере насосной станции третьего подъема ООО «Томскводоканал»): дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2016. – 140 с.
9. *Грачева Е. И.* Развитие теории и методов оценки эффективности функционирования низковольтных электрических сетей промышленных предприятий : дис. ... д-ра техн. наук. – Казань, 2014. – 564 с.
10. *Ахметханов Р. С., Дубинин Е. Ф., Куксова В. И.* Анализ временных рядов в диагностике технических систем // *Машиностроение и инженерное образование.* – 2013. – № 2. – С. 11–20.
11. *Доманов В. И., Билалова А. М.* Прогнозирование объемов энергопотребления в зависимости от исходной информации // *Вестник ЮУрГУ. Сер. : Энергетика.* – 2016. – Вып. № 2, т. 16. – С. 59–65.
12. Исследование случайной составляющей. – URL: <https://studme.org/179010019470.html> (дата обращения: 04.12.2023).
13. Оценка статистической значимости // *WikiHow. Образование и коммуникации.* – URL: <https://ru.wikihow.com.html> (дата обращения: 04.12.2023).

В. П. Башкирцев,
кандидат педагогических наук, доцент;
В. А. Кулганов,
доктор медицинских наук, профессор;
И. М. Купцов,
кандидат военных наук, доцент

УЧЕТ ПСИХОЛОГИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ В МОДЕЛИ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ ВОЕННО-ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ В ИНТЕРЕСАХ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫХ ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫХ СИСТЕМ

Автоматизация процесса управления войсками способствует повышению эффективности применения сложных человеко-машинных систем (СЧМС) в процессе их эксплуатации по назначению. Человек-оператор в ходе возникновения внезапно возникающих ситуаций, требующих незамедлительной реакции, качественно превосходит автоматизированные образцы вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ) в ходе принятия решений. Являясь неотъемлемой частью СЧМС в процессе управления войсками, он должен обладать определенными компетенциями, основанными на знаниях инженерной психологии, эргономики, психологии труда, формирование которых требует учета его психологических особенностей в процессе подготовки военно-инженерных кадров. Целью публикации являются выявление, анализ и учет психологических аспектов в модели профессиональной подготовки военно-инженерных кадров в интересах повышения эффективности управления СЧМС.

Ключевые слова: человек-оператор, сложные человеко-машинные системы, автоматизированные системы управления войсками, технические системы управления, инженерная психология, модель профессиональной подготовки военно-инженерных кадров.

ВВЕДЕНИЕ

Автоматизированная система управления войсками (АСУВ) Вооруженных сил (ВС) России имеет принципиальное отличие от зарубежных аналогов, заключающееся в том, что в процессе автоматизации управления только человек-оператор на основе собранной и обработанной информации принимает решение на ее использование и применение ударных комплексов вооружения по их назначению. В этих условиях особую актуальность приобретают вопросы, связанные с профессиональной подготовкой военно-инженерных кадров и учетом их психологических особенностей в интересах повышения эффективности управления СЧМС.

Улучшение современных средств разведки и целеуказания за счет применения актуальных в настоящее время технологий искусственного интеллекта (ИИ) не должно сказаться на возможностях человека-оператора по приему информации, по ее обработке и принятию решения. Для повышения эффективности взаимодействия человека и машины (автоматического устройства) внутри СЧМС профессиональная подготовка военных специалистов (управленцев) должна осуществляться на основе положений теории военного управления и инженерной психологии, которая изучает взаимодействие человека с машинами, приборами и автоматизированными устройствами, а также их влияние на утомляемость оператора, на его способность сохранять внимание и работоспособность в течение длительного периода времени.

Психологические особенности человека-оператора в СЧМС. Основные процессы и явления окружающего мира человек воспринимает через зрительные, слуховые, обонятельные, осязательные органы и с определенной степенью адекватности реагирует на воспринимаемую информацию, т. е. в основе взаимодействия человека-оператора с техническими устрой-

ствами лежат два процесса – восприятие и реакция. Человек-оператор в СЧМС может выполнять различные функции:

1) функцию *наблюдателя* (пассивное наблюдение за происходящими в устройстве процессами). Этот вид деятельности характерен для полностью автоматических систем, а присутствие оператора необходимо для дополнительной регистрации и фиксации протекающих в системе процессов;

2) функцию *корректора* технического устройства. В случае выхода параметров такого устройства за пределы допустимых значений у оператора имеется возможность вмешательства в процесс функционирования и его регулирования с целью поддержания заданных параметров (режимов работы);

3) функцию *управляющего* технической системой. Тогда оператор с помощью приборов определяет состояние системы и, манипулируя органами управления, поддерживает ее в рабочем состоянии.

Общим для всех трех функций человека-оператора в СЧМС является то, что он не просто воспринимает происходящее, но и реагирует на сигналы о состоянии системы и в случае необходимости принимает решение об управляющем воздействии на систему, нормализующем ее режим работы.

При реализации любой из этих функций, в зависимости от своих индивидуальных психологических особенностей, человек может сделать ошибку и оказаться в одной из следующих ситуаций:

1) заметить ошибку и сразу ее исправить – немедленная реакция на ошибку;

2) заметить ошибку, не исправив ее, посчитав, что она не приведет к серьезным осложнениям, – решение, свидетельствующее или о большом опыте, или о небрежности, или о малом опыте и недостаточной подготовке оператора;

3) не заметить ошибку, но исправить результат ее воздействия на систему после выполнения ею нескольких последующих операций – замедленная реакция на ошибку;

4) не заметить и не исправить ошибку – полное отсутствие реакции на ошибку [15].

Исходя из анализа вышеизложенных психологических особенностей и поведенческих реакций человека-оператора, можно сделать вывод о необходимости создания условий для активного личностно-профессионального развития военно-инженерных кадров на этапе их профессиональной подготовки в вузе и о коррекции, в зависимости от их личных особенностей, модели самой профессиональной подготовки.

Структура современной системы управления. Процесс перераспределения функций между компонентами СЧМС развивается по пути создания наиболее совершенных в настоящий момент систем типа «человек – боевой автоматизированный комплекс». Достижения современного научно-технического прогресса, связанные с появлением и широким применением ИИ в вычислительных устройствах и сетях, предопределили специфику нынешнего периода совершенствования системы управления войсками (СУВ), которая заключается в развитии технических средств управления и создании автоматизированных систем управления военного назначения, охватывающих все сферы вооруженной борьбы, включая информационную и воздушно-космическую.

Одной из составляющих ВС, влияющих на их боеспособность, является степень централизации системы управления, во многом зависящая от взаимодействующих между собой ее составляющих (человек – боевая техника). Существенно повысить степень взаимодействия этих систем можно с помощью инженерной психологии, решающей проблемы учета человеческих особенностей военно-инженерных кадров – от восприятия информации до профессионального и оперативного манипулирования органами управления современных образцов ВВСТ.

Современные исследования проблем развития отечественной системы подготовки военно-инженерных кадров подтверждают, что наша национальная инженерная школа существенно отличалась в годы испытаний от признанной немецкой и развитой американской [10], что

тем не менее не мешает нам в комплексе учитывать их богатый и разнообразный опыт в процессе ее развития.

В структурном отношении система управления состоит из управляющей подсистемы (управляющего звена) и управляемой подсистемы (управляемого объекта). Между ними существует связь, реализованная по двум каналам. По каналу обратной связи управляющее устройство получает информацию о состоянии объекта управления. По каналу прямой связи проходит сигнал, определяющий характер действия управляемого объекта.

Система управления образует замкнутый контур, и сам процесс управления носит ярко выраженный циклический характер. В его основе лежит циркуляция информации: получение управляющим звеном исходной информации, ее хранение, переработка и выдача в преобразованном виде на управляемый объект.

Разумеется, это упрощенное описание функционирования системы управления, так как реальная система управления выступает как иерархия его различных контуров. Причем сложность системы, количество включенных в нее контуров определяются спецификой задач, решаемых системой, и воздействиями внешней среды, в которой протекает процесс управления.

Конкретные задачи, стоящие перед указанными системами в военном деле, вытекают из его специфических целей и, в свою очередь, определяют конструктивное выполнение управляющей системы. Системы управления в военном деле подразделяются на два вида: системы управления боевой техникой и системы управления войсками. Признавая этот факт, некоторые исследователи вместе с тем утверждают, что процесс управления войсками якобы отличается от управления боевой техникой только масштабом. На самом деле, это далеко не так.

Структура системы управления войсками (СУВ) в упрощенном виде может быть представлена следующим образом: управляющим органом является командир, возглавляющий звено, оснащенное разнообразной управленческой техникой, а управляемым звеном являются войска – сложная «суперсистема», состоящая из множества иерархически взаимосвязанных соединений, частей и подразделений.

Технические средства управления войсками. В настоящее время технические *средства управления войсками* можно условно разделить на три основные группы, различающиеся характером функций, выполняемых в СУВ.

Первая группа – это *средства получения информации* о боевой обстановке. Территориально они размещаются в войсках. В их задачу входят добывание сведений о своих войсках, противнике, а также об условиях боевых действий – топографической, метеорологической и радиационной обстановке, и первичная классификация таких сведений.

Вторая группа – это *средства передачи информации*. В задачу данной группы технических средств входят передача информации о боевой обстановке от управляемых объектов и средств сбора информации к управляющему органу по принципу обратной связи, а также транслирование командной информации на управляемые объекты по пути прямой связи. Кроме того, технические средства подачи информации позволяют распределять ее как внутри различных контуров системы управления войсками, так и между этими контурами. Территориально средства связи размещаются в управляемых войсках и в различных звеньях СУВ.

Третья группа – это *автоматизированные устройства*, предназначенные в общем виде для обработки поступающей боевой информации от войск и для переработки ее в командную информацию. Эта группа технических средств органически включена в звено управления войсками.

Неоднократно предпринимались попытки создания технических устройств, выполняющих все функции командира (в том числе и мыслительные) в процессе управления войсками. Однако все практические попытки полного устранения человека из АСУВ потерпели провал. Внедрение автоматической техники не только не освобождало человека от необходимости

мыслить, но и предъявило новые, чрезвычайно высокие требования к процессу творческого мышления командира.

Все вышеизложенное заставило ученых по-новому взглянуть на проблемы автоматизации управления войсками и поставить перед собой важную в методологическом отношении научную задачу – провести детальные исследования по вопросам рационального соотношения способностей человека-оператора и возможностей автоматической техники в СЧМС, а также тщательный учет психологических аспектов в ходе профессиональной подготовки военно-инженерных кадров.

Исторические особенности подготовки военно-инженерных кадров. Накануне и в годы Великой Отечественной войны военно-инженерная подготовка обучающихся базировалась на синтезе теории и практики в течение всего срока обучения. Теоретическая подготовка строилась по принципу – *от общего к частному*, т. е. от общетеоретических дисциплин – через общеинженерные – к специальным, диапазон которых был очень широк. Практическая подготовка строилась по принципу – *от простого к сложному*, от задач ремесленных к задачам инженерным, она осуществлялась в учебных мастерских, на опытных заводах, в процессе производственной практики на предприятиях [10].

С ростом научно-технического прогресса возникли и получили широкое распространение управляющие звенья, в которых человек передал часть своих управленческих функций автоматической технике [13]. Такие звенья составили ядро АСУВ, представляющую собой большую СЧМС, в которой функционируют многочисленные воинские коллективы и системы вычислительной и другой управленческой техники. В данной системе ввиду сложности внешних условий управляющее звено не располагает конечным набором программ (алгоритмов) на все случаи функционирования управляемых объектов, и, следовательно, оно неразрывно связано с творческим мышлением конкретного командира. Создание условий для творчества обучающихся явилось обязательным направлением решения проблемы эффективной реализации задач военно-инженерной психологии в образовательной деятельности. Одним из таких условий стало моделирование в образовательном процессе ситуаций «человек-техника», рабочего места оператора, решения нештатных ситуаций в деятельности специалиста-выпускника и др.

Со временем критерий автоматизации управления войсками претерпевает изменение. Вместо *максимальной* автоматизации встал вопрос об *оптимальной* автоматизации [6]. Если автоматизация управления боевой техникой шла по пути устранения человека из системы, то автоматизация управления войсками способствовала внедрению техники во взаимосвязь между людьми и боевой техникой. В целом автоматизация процессов управления войсками позволила повысить эффективность сбора, обработки и передачи информации о боевой обстановке, облегчила и сделала более совершенными все оперативно-тактические расчеты для принятия решения на применение, позволила ускорить доведение боевых задач до исполнителя, повысить действенность контроля за подчиненными войсками. Особую значимость все это приобретает при условии применения противником оружия массового поражения, когда внедрение автоматической техники позволяет обеспечить быстрый сбор информации о радиационной обстановке, осуществить точные расчеты по ее прогнозированию, своевременно предупредить войска об опасности, оценить их боеспособность в очагах поражения, принять решение на восстановление боеспособности и на ликвидацию последствий применения ядерного оружия.

Система «человек – военная техника» характеризуется неравнозначностью основных ее компонентов. Техническое устройство на любой ступени своего развития является лишь орудием человеческой деятельности.

Однако решение проблемы практического конструирования систем АСУВ требует изменения психологии военного инженера и создания такого теоретического аппарата, который позволил бы рассматривать человека и автоматическое устройство с одинаковых позиций с целью сравнения их возможностей при выполнении определенных управленческих функ-

ций. Самым распространенным видом конструктивной реализации автоматических устройств являются электронные вычислительные машины [12].

В соответствии с вышеизложенным можно сделать вывод, что процесс управления начинается строиться преимущественно с определенного целенаправленного изменения состояния управляющей системы, информация о котором по цепи прямой связи поступает в управляемую систему и также вызывает определенные изменения ее состояния. В свою очередь, информация от управляемой системы, поступающая в управляющую систему по цепи обратной связи, является исходным основанием для нового изменения состояния управляющей системы, которое вновь вызывает изменение состояния управляемой системы. Такой перевод управляемой системы из одного состояния в другое, являясь формальной стороной цели процесса управления, не может строиться эффективно вне компетентности в области инженерной психологии. Для него координированы функции управляющей и управляемой систем как элементы единого функционального комплекса. Содержательная же сторона цели управления зависит от конкретного назначения данной системы и от условий, в которых этот процесс протекает.

Сущность и содержание цикла управления в СЧМС. Процесс управленческой деятельности выступает как ряд преобразований информации, циркулирующей в контуре управления, а управляющая система – как определенный преобразователь информации об управляемом объекте, вырабатывающий решение и выдающий его в виде команды на управляемый объект. Все это и составляет элементарный цикл управления.

В современной научной литературе последовательность этапов элементарного цикла управления, осуществляемого управляющим звеном, принято представлять следующим образом.

1. Прием информации об объектах управления и о тех условиях, которые важны для управления. На этом этапе происходят обнаружение сигналов (выделение из помех), их расшифровка, выделение нужной информации, приведение ее в наиболее удобный для оценки вид (декодирование).

2. Переработка информации и принятие на ее основе решения. На этом этапе происходят анализ информации, ее оценка и выработка соответствующего решению управляющего воздействия.

3. Преобразование принятого решения в определенную последовательность сигналов, их кодирование и выдача исполнителям по каналам связи.

Выделение этих этапов является весьма условным, так как в реальной системе эти функции диалектически связаны между собой. Вместе с тем эффективность выполнения каждой из этих функций может служить научным основанием для сравнения функциональных возможностей человека и автоматического устройства [8]. Квалификационные требования к военному инженеру в области психологии обязывают профессорско-преподавательский состав военного учебного заведения заботиться о своевременном развитии у обучающихся точного зрительного, слухового и кинестетического *восприятия*; умений переключать и концентрировать *внимание*; обладать техническим *мышлением* и творческим *воображением*; владеть хорошей *координацией движений* и другими профессионально важными для специалиста в области СЧМС качествами.

Этап 1. На первом этапе приема информации в ходе исследования степени участия человека следует отметить, что в настоящее время принято выделять три момента информационного восприятия – обнаружение, различение и идентификацию.

Первым моментом восприятия является информационный поиск – обнаружение наличия нужной информации на фоне шумов (помех, других сигналов). В информационном обнаружении проявляется активность человеческого восприятия: в зависимости от характера решаемой задачи военный инженер воспринимает один и тот же сигнал по-разному, выделяет в нем интересующие его признаки. Именно на этой основе и осуществляется так называемое

мое «стимульное опознание» наличия нужной информации в сигнале – почти мгновенное, без перебора всех несущественных в данном случае признаков сигнала.

После обнаружения наличия информации в данном сигнале необходимо осуществить операцию ее извлечения. Такая операция совершается с помощью различных органов чувств и содержит в себе два необходимых момента – различение и идентификацию. Сущность указанной операции состоит в соотнесении данного сигнала с эталоном, существующим в голове человека в виде так называемой «субъективной шкалы». Относительно этого представления и происходит оценка воспринимаемых сигналов – их различие или совпадение с имеющимся эталоном, информативное содержание которого заранее известно.

Однако опознание сигнала еще не означает опознания объекта управления: сигнал необходимо еще декодировать, т. е. превратить в представление о реальной обстановке. Это трансформирование воспринятого сигнала в представление об управляемом объекте является творческим процессом. В нем формируются индивидуальные критерии адекватности образа реальному миру, индивидуальное восприятие объективного мира специалистом, наделенным всеми развитыми с точки зрения инженерной психологии профессиональными качествами.

Специфика процесса приема информации человеком определяется целенаправленным характером его познавательной деятельности, формирующимся на уровне социального отражения и обеспечивающим активный информационный поиск, обнаружение нужных в данный момент сигналов. Они, в свою очередь, вносят определенную логику в процессы различения, идентификации и декодирования информации [4].

В реальных системах управления, в том числе и в АСУВ, информация в управляющее звено поступает обычно в виде информационной модели объекта регулирования, отражающей как отдельные свойства объектов, так и соотношение между объектами. В этом случае первостепенное значение имеет сопоставление сведений, полученных с помощью устройств отображения информации, с реальными управляемыми объектами. Данная операция является в сущности основной на первом этапе переработки информации. Она заключается в декодировании воспринятой оператором информации, в реконструировании реальных признаков (состояний) объектов, не нашедших отображения в предъявленной информации или утерянных во время ее передачи.

В дальнейшем после декодирования информации, полученной на экранах индикаторов (мониторов ПЭВМ), она может быть дополнена имеющимися данными о возможных состояниях объекта при аналогичных обстоятельствах.

На сегодняшний день большое внимание военные психологи уделяют проблеме моделирования некоторых психофизиологических функций военнослужащего-оператора. Из числа таких моделей наиболее широкое распространение получили модели распознавания зрительных образов, лежащих в основе «читающих» и «опознающих» технических устройств, воспринимающих информацию без перевода ее в иные, промежуточные формы [5].

Появление технических устройств, довольно успешно моделирующих психофизиологические функции человека по приему информации, привело к необходимости решения ряда философско-методологических проблем.

Так, в связи с повышением возможностей автоматизированной техники встает вопрос о степени адекватности ее работы тем сторонам психической деятельности человека, которые моделируются. Без этого очень легко наделять автоматическое устройство теми свойствами, которыми оно не обладает и которые являются сугубо «человеческими» качествами. В рассматриваемом нами аспекте это поможет распределять функции не только по чисто внешним признакам, но и с учетом качественных особенностей функционирования данных компонентов [3].

Общим недостатком всех технических устройств, моделирующих психофизиологические функции человека по приему и обработке информации, является их неадекватность процессам восприятия информации человеком, его способности к анализу сложных структурных изображений, определяемых творческим, активным, целенаправленным процессом отраже-

ния действительности [7]. Кроме того, при сравнении возможностей человека и автоматического устройства на этом этапе переработки информации следует учитывать, что в целом возможности «сенсорных входов» человека не ограничены каким-либо одним способом подачи сигнала. Оператор может получать информацию как непосредственно от управляемого объекта, так и с помощью всевозможных «косвенных показателей», причем переход от одной формы восприятия к другой осуществляется исключительно быстро и адаптивно. Подготовленный с позиций инженерной психологии специалист обладает способностью восстанавливать пропущенную, искаженную информацию, быстро перестраиваться при изменении способов ее подачи, объединять отдельные сигналы в целостную структуру и на основании этого находить более адекватные способы ее переработки [2].

Что касается автоматического устройства, то оно может воспринимать только те сигналы, которые адресованы непосредственно ему по соответствующим каналам, но превосходит способности оператора по переработке максимального объема информации, принимаемой и перерабатываемой в единицу времени.

Результаты сравнения возможностей военного инженера и автоматической техники АСУВ (на современном этапе ее развития) по приему и обработке информации свидетельствуют о качественном превосходстве оператора, способного творчески осмысливать воспринимаемую информацию. Вместе с тем автоматическим устройствам присущи такие свойства, как принципиально не ограниченная пропускная способность, точность и быстрота отображения, неутрачиваемость, которые позволяют уже в настоящее время реализовывать определенные функции по приему и обработке информации, не связанные с ее осмыслением. Это дает возможность уже сейчас создавать устройства, освобождающие военного специалиста от механической, рутинной работы и расширяющие его психофизические возможности и способности. Возможности оператора и технического устройства на этапе приема и обработки информации в СЧМС определяются творчеством и психофизиологическими процессами конкретного должностного лица, принимающего решение, и остаются сложно формализуемыми, но в дальнейшем могут быть переданы техническому устройству [1], о чем свидетельствует широкое распространение вычислительных сетей с элементами ИИ.

Этап 2. Вторым этапом обработки информации, осуществляемой управляющим звеном «человек – военная техника», является процесс подготовки и принятия решения, реализуемый на основе переработки воспринятой информации. Такой этап занимает исключительно важное место в процессе управления, так как именно в его ходе наиболее полно проявляется специфика мыслительной операторской деятельности [11].

Безусловно, степень участия автоматической техники в процессе принятия решения полностью зависит от успехов логико-математической формализации мыслительных функций. Можно сказать, что все дедуктивные решения, в силу возможности составить их алгоритм, могут быть переданы автоматической технике. Ее совершенствование, создание устройств, способных опознавать образы, позволили военным специалистам создать системы, которые могут решать абдуктивные задачи (опознавать сигналы от цели на фоне шумов, пассивных помех, отметок от облаков, птиц и т. д.).

Индуктивные решения в реальных АСУВ принимаются военным специалистом-оператором. Эффективность индуктивных преобразований зависит в основном от тех факторов, которые влияют на перцептивную организацию информации, т. е. задачу, выполняемую человеком на уровне восприятия.

Наиболее важную роль в реальных АСУВ играют прогностические решения, позволяющие распланировать всю совокупность воздействий на управляемые объекты, предусмотреть и заранее выработать необходимую последовательность операций (действий) в ответ на активное противодействие противника.

Вопрос о практическом участии автоматического устройства в процессе принятия решения во многом связан с возможностью создания самообучающихся автоматических систем

на основе технологий ИИ, способных к индуктивным выводам, лежащим в основе творческой деятельности оператора.

При столкновении военного специалиста с проблемой, характер решения которой заранее неизвестен, в его голове возникает информационная модель проблемной ситуации, состоящая из элементов условий задачи, отраженных в их тесной взаимосвязи. При непрерывном восприятии информации об обстановке военный инженер творчески анализирует эти условия, находит новые связи и отношения между ними. Он их анализирует, осмысливает, уточняет и в конечном итоге преобразует ранее сложившуюся в его голове «информационную модель» в направлении, ведущем к творческому решению возникшей проблемы.

Качественное отличие деятельности оператора от функционирования автоматической техники на втором этапе переработки информации заключается прежде всего в творческой способности человеческого мышления.

Этап 3. Третьим этапом обработки информации в процессе управления является доведение принятого решения до исполнителей. Эта операция связана с кодированием принятого решения, преобразованием его в определенную последовательность сигналов и выдачей их исполнителям по каналам связи [9].

Деятельность военного специалиста в этом случае сводится в АСУВ к выбору необходимых исполнительных действий по определенному алгоритму, обеспечивающему их соответствие определенным сигналам. Этот этап предусматривает широкое использование автоматических устройств, осуществляющих кодирование информации, выбор соответствующей модальности канала связи и распределение информации по каналам. Только профессионально подготовленный военный инженер (оператор) в процессе творческого мышления может правильно выбрать соответствующую форму приказа, облечь его в наиболее приемлемый для воздействия на подчиненных (исполнителей) образно-словесный вид, что обеспечивает высокую вероятность его доведения и эффективность исполнения.

Результаты сравнительного анализа составных частей СЧМС. Практический опыт формализации мыслительных функций военного специалиста свидетельствует о том, что определенные аспекты творческого мышления могут быть делегированы автоматическому устройству.

Одним из конкретных путей формализации процессов творческого мышления оператора является эвристическое моделирование, позволяющее найти способ решения задач оператором в проблемной ситуации, для которой нет готовых схем поведения, стереотипных программ и неизвестны способы достижения желаемого результата. Выработка решения в данном случае требует совершенно новых приемов и схем действий оператора с ориентированием на быстро изменяющиеся условия обстановки и нештатные ситуации.

Наиболее типичным недостатком всех существующих в настоящее время эвристических программ является то, что они моделируют лишь информативную сторону деятельности военного специалиста. Что же касается эмоционального фактора, столь необходимого в мыслительной сфере оператора, то он в программах такого рода не учитывается.

Автоматическое устройство должно играть роль не интеллектуального двойника оператора, а должно являться интеллектуальным орудием его творческих сил, т. е. усиливать и создавать благоприятные условия для их развития.

Сопоставление возможностей специалиста и автоматического устройства как компонентов АСУВ на различных этапах обработки информации позволяет сделать вывод о принципиальной невозможности исключения человека - оператора из процесса управления войсками. Основными причинами здесь являются следующие: во-первых, высококвалифицированный военный инженер превосходит автоматические устройства в управлении сложными динамическими объектами в условиях быстро меняющейся обстановки в сфере управления подчиненными; во-вторых, социальность, коммуникабельность и умение работать с подчиненными позволяют ему быть определяющим звеном управления при любом уровне развития автоматической техники [6].

Происходящий на сегодняшний день процесс широкого внедрения во все сферы военного дела разнообразной вычислительной техники и элементов ИИ привел к качественному изменению места и роли человека в СЧМС. Сейчас АСУВ представляют собой наиболее развитую форму организации взаимосвязи человека и военной техники [14], в которой воинский коллектив использует систему автоматических устройств в качестве «интеллектуального» коллективного орудия управленческой деятельности, технического средства усиления и расширения своих интеллектуальных и психофизиологических способностей.

Проведенный анализ показывает, что внедрение автоматических средств в процесс управления войсками предопределило возрастание руководящей роли командира, усилило степень централизации управления и повысило его эффективность.

Вместе с тем процесс принятия решения на применение является довольно сложным. Он включает в себя элементы планирования и прогнозирования, определение последствий принимаемых решений и единоличную ответственность командира, что значительно повышает удельный вес «человеческого фактора» в ходе его принятия и предъявляет высокие требования к профессиональной подготовленности военного инженера (оператора) в АСУВ.

Модель профессиональной подготовки военно-инженерных кадров. Одним из эффективных путей решения проблем профессиональной подготовки военно-инженерных кадров в образовании, по нашему мнению, являются учет психологических особенностей конкретного человека-оператора в СЧМС и сосредоточение усилий подготовки на его психологической готовности к выполнению управленческих задач в АСУВ в соответствии с предлагаемой моделью (рис. 1).

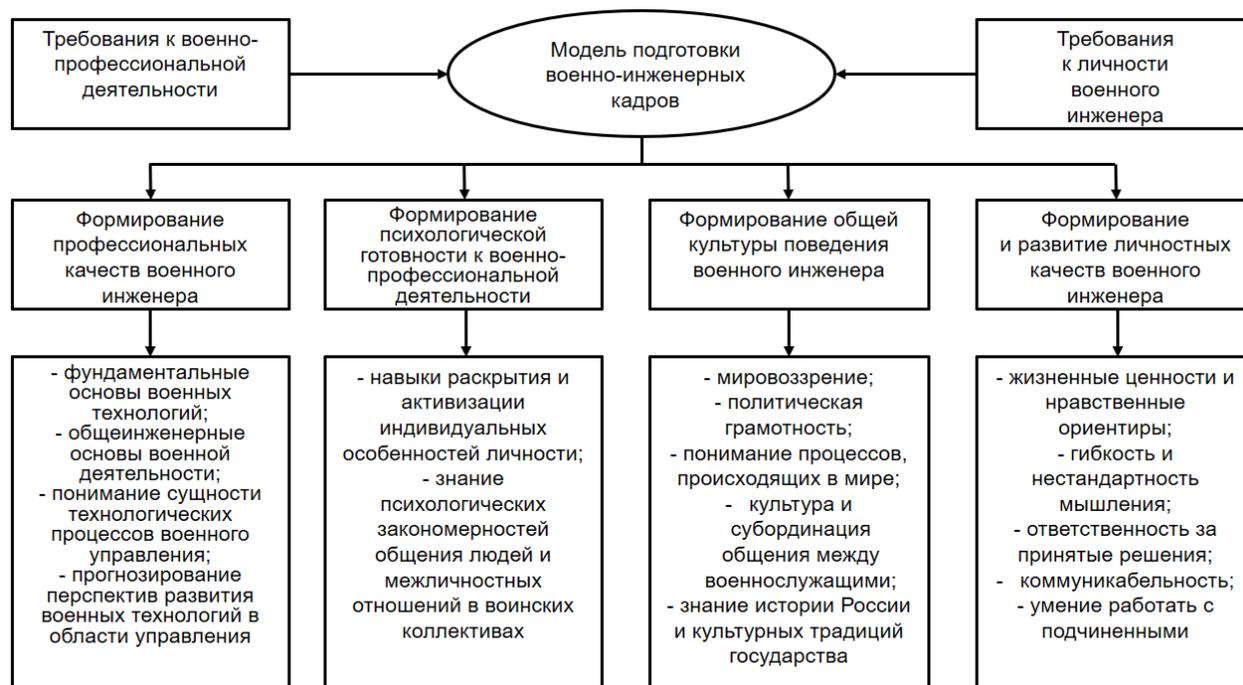


Рис. 1. Структура модели профессиональной подготовки военно-инженерных кадров

В соответствии с предлагаемой моделью основные направления совершенствования профессиональной подготовки военных инженеров в части, касающейся их психологической готовности к выполнению управленческих функций, можно представить в следующем виде:

1) психологическая подготовка будущих военных инженеров в вузе должна базироваться на личностном, деятельностном и целевом подходах и должна учитывать специфику военного управления АСУВ будущей профессиональной деятельности, важным компонентом которой является выполнение управленческих функций;

2) необходимость изучения в ходе профессиональной подготовки реальных потребностей современных военных руководителей в знаниях и умениях с целью включения в образовательный процесс обучающихся необходимых коммуникативных, в том числе психологических, знаний и умений, которые позволили бы существенно сократить время их адаптации, становления и развития как специалистов и руководителей в воинских коллективах;

3) качественная подготовка будущих военных инженеров, которую может обеспечивать педагогическая система, базирующаяся на комплексном подходе, должна объединять глубокое изучение дисциплин по военной специальности со сквозной профессионально ориентированной психологической подготовкой на всех квалификационных уровнях;

4) подготовка будущих специалистов к военно-управленческой деятельности должна иметь четкую практическую направленность, обеспечивающуюся применением современных педагогических технологий, организацией практик и стажировок в реальных воинских частях и формированием у обучающихся навыков системного подхода к анализу сложных проблемных ситуаций;

5) педагогическая система подготовки обучающихся к будущей военно-инженерной деятельности должна быть ориентирована на высокий профессионализм, усиление профессиональной мобильности специалиста, на привитие ему внутренней потребности в непрерывном самообразовании и самосовершенствовании в целях эффективного решения военно-управленческих задач;

6) проектирование педагогической системы профессиональной подготовки военно-инженерных кадров, выбор ее целей, содержания и структуры, а также научно-методического и материального обеспечения должны осуществляться, исходя из содержания и характера его будущей военно-управленческой деятельности, и ставить целью подготовку творческих личностей с высоким уровнем ответственности, духовности и морали [16].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С ростом интеграции науки и техники, расширением технических возможностей возрастает и роль автоматизации в процессе принятия решений командиром. Однако это в основном касается функций, связанных с обработкой информации. Творческие же аспекты деятельности военного инженера-оператора, опосредованные субъективными факторами развития личности, остаются приоритетными направлениями подготовки специалистов.

Профессиональная подготовка военно-инженерных кадров в современных условиях должна учитывать индивидуальные психофизические особенности и психологическую готовность человека-оператора к выполнению военно-управленческих задач его профессиональной деятельности.

Таким образом, повышение уровня подготовки военно-инженерных кадров для Вооруженных сил остается ключевой проблемой военного вуза. Решение проблемы возможно на основе интеграции достижений инженерной психологии в образовательные программы не только инженерных, но и командных специальностей. Учет психологических аспектов в ходе профессиональной подготовки военно-инженерных кадров в соответствии с предлагаемой моделью подготовки является важным условием сокращения сроков приведения в готовность средств вооружения и техники, повышения эффективности управления при применении СЧМС по их предназначению.

Список используемых источников

1. Абжанова Л. К., Курентаев А. Б. Разработка автоматизированной системы управления теплоэнергетического комплекса // Молодой ученый. – 2022. – № 17(412). – С. 11–14.

2. *Бавула А. А., Мухитов Э. И.* Сетевые автоматизированные системы управления техническим обеспечением ВМФ: проблемы их разработки и методы решения // Программные продукты и системы. – 2019. – № 2. – С. 299–305.
3. *Багрецов С. А., Кулганов В. А., Кулганов А. В.* Групповая деятельность специалистов в системах управления : моногр. – СПб. : Изд-во ВВМ, 2020. – 198 с.
4. *Забиров И. И., Машикина И. В.* Применение систем идентификации и управления доступом в автоматизированных системах управления технологическими процессами // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. – 2022. – № 2. – С. 98–105.
5. *Мешков В. Г., Капитонов А. В., Феофанов А. Н.* Тенденции создания и развития интегрированных автоматизированных систем управления // Технологии машиностроения. – 2022. – № 5. – С. 50–53.
6. Модели взаимного резервирования операторов дежурных расчетов в процессе совместной деятельности / С. А. Багрецов [и др.] // Экология и развитие общества. – 2020. – № 1(32). – С. 37–46.
7. *Наумов В. В., Захарова Е. А.* К вопросу оценки эффективности информационно-аналитической деятельности органов управления // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России : научно-аналитич. журн. – 2021. – № 3. – С. 81–89.
8. *Наумов В. В., Цельковских А. А., Шигин В. А.* Методический подход к формированию нормативной модели информационно-аналитической деятельности органа военного управления // Вестник Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулёва. – 2023. – № 1(33). – С. 49–55.
9. Ошибки оператора в режиме ввода информации и их контроль / С. А. Багрецов [и др.] // Воздушно-космические силы. Теория и практика. – 2020. – № 16. – С. 37–49.
10. Подготовка инженерных кадров ВМФ и судостроительной промышленности накануне и в годы Великой Отечественной войны / Б. А. Барбанель [и др.]. – СПб., 2020. – 147 с.
11. *Савельева М. А., Прокофьева А. В.* Предпосылки внедрения автоматизированных систем управления в деятельности организации // Международный академический вестник. – 2018. – № 1-2(21). – С. 87–89.
12. *Сакман Г.* Решение задач в системе человек – ЭВМ. – М. : Мир, 2020. – 352 с.
13. *Фролов А. В., Гуменный В. В., Жарков А. В.* Порядок определения рациональных технико-экономических показателей автоматизированной системы управления техническим обеспечением части зенитных ракетных войск // Вестник Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны. – 2019. – № 4(7). – С. 157–161.
14. *Цельковских А. А., Наумов В. В.* Концептуальные подходы организации информационно-аналитической деятельности органов военного управления // Вестник Академии военных наук. – 2020. – № 1(70). – С. 63–69.
15. *Выходцева М. В.* Проблема подготовки современных инженерных кадров в высших учебных заведениях // Материалы VI Международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум». – URL: <https://scienceforum.ru/2014/article/2014002554> (дата обращения: 16.04.2024).
16. *Ланских М. В.* Психологическая подготовка как компонент профессионального образования современных инженеров // Научные ведомости. Сер. : Гуманитарные науки. – 2013. – № 20 (163). – С. 271–279.

Л. А. Иноземцева;
Н. С. Кужекин,
кандидат философских наук, профессор

ПСИХОЛОГО-ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ СОВРЕМЕННОЙ КУЛЬТУРЫ ОБУЧЕНИЯ В ВОЕННО-УЧЕБНОМ ЗАВЕДЕНИИ

В публикации рассматриваются актуальные психолого-педагогические проблемы формирования современной культуры обучения как совокупности определенных норм, ценностей и педагогических практик, существующих в образовательной среде и влияющих на взаимодействие между всеми участниками образовательного процесса, а также предлагаются направления формирования культуры обучения в академии.

Ключевые слова: культура обучения, технология обучения, педагогическая культура, профессиональная подготовка, повышение квалификации, цифровая образовательная среда, современные технологии обучения, активные методы обучения.

Современные потребности информационного общества с повсеместным внедрением цифровых технологий и искусственного интеллекта в различные области жизнедеятельности человека порождают необходимость существенных трансформаций в сфере образования.

Первостепенной целью образования в существующих условиях становится активное формирование личности, способной к профессиональному и личностному самоопределению, к реализации собственных индивидуальных ресурсов, интеллектуального и творческого потенциала, умеющей применять нестандартный подход при выполнении сложных задач, обладающей устойчивой системой мотивации к непрерывному совершенствованию в постоянно меняющихся условиях трудовой деятельности. В связи с этим наиболее актуальной и сложной задачей высшей школы является подготовка специалиста, проявляющего готовность осуществлять профессиональную деятельность в качественно новых условиях. Такая подготовка, на наш взгляд, выдвигает на первый план проблему глубинных ценностей, ценностных ориентаций и смыслов, формирование которых является серьезным процессом и ориентировано прежде всего на возвращение у обучающихся особого отношения к приобретаемым знаниям, к учебной деятельности и необходимости непрерывного профессионального самосовершенствования в быстро меняющемся мире, а также отношения к обществу и миру в целом.

Одной из главных задач современного образования также признается направленность учебного процесса на формирование у обучающихся способности к принятию внедряемых в жизнь общества инноваций, к открытости новому опыту и обновлению личного знания, что достигается посредством развития не только аналитического, но и творческого, критического мышления. В связи с этим существующие подходы к обучению должны трансформироваться в совершенно новую культуру обучения, соответствующую актуальным потребностям и условиям изменяющегося мира и ориентированную на динамичное, самостоятельное, мотивированное и целостное обучение. Необходим переход образовательной системы к новой модели культуры обучения, что позволит перевести образовательный процесс на качественно новый уровень, повысить эффективность учебной деятельности в целом.

Феномен культуры обучения как предмет научных исследований изучен и описан в психолого-педагогической литературе недостаточно. Термин «культура обучения» в Российской Федерации стал употребляться в начале 2000-х годов. Необходимость глубокого анализа данного понятия обусловлена его активным употреблением в различных сферах практической деятельности.

На наш взгляд, всестороннее изучение данного феномена создает предпосылки для определения новых направлений и тенденций развития современной школы, корректируя содержание

существующей системы образования. Некоторые исследователи культуры обучения отождествляют ее с «культурой организации учебной деятельности», «культурой образования», «культурой преподавания» [5]. Другие же авторы считают схожим по смыслу определением для понятия «культура обучения» термин «дидактическая культура» или понимают ее как отдельный вид педагогической культуры [1, 7]. В немногочисленных педагогических изданиях обнаруживается противопоставление термина «культура обучения» термину «технологии обучения», – ряд исследователей полагает, что именно термин «культура обучения» порождает более широкое видение образовательного процесса.

На сегодняшний день не существует точного определения содержания данного понятия, тем не менее, педагоги-психологи продолжают использовать данный термин при решении разнообразных педагогических задач. При этом субъектом культуры обучения чаще всего выступает образовательное учреждение, в то время как носителем педагогической культуры является преподаватель, обладающий профессионально-педагогическими ценностями и владеющий образовательными технологиями.

Новая модель, ориентированная на удовлетворение насущных потребностей социума, должна закрепить главную цель обучения – создание необходимых условий для формирования у обучающихся своего личностного и интеллектуального потенциала, актуализации своих творческих способностей и устойчивой мотивации. Учебный процесс при этом должен носить познавательный и исследовательский характер. Такое целостное, продуктивное обучение определяет современную культуру обучения, понимаемую нами как *совокупность определенных норм, ценностей и поведенческих практик, детерминирующих совместную деятельность субъектов образовательной деятельности и способствующих достижению целей обучения.*

Культура обучения является важнейшим атрибутом учебного заведения и ключевым аспектом успешности образовательного процесса, поскольку качество образовательного процесса определяется не только технологией обучения как совокупностью способов и средств обучения, но и отношением всех субъектов педагогического процесса к своему образованию, развитию и профессиональному совершенствованию. Сосредотачиваясь лишь на технологии обучения, образовательный процесс теряет свой ценностный смысл [3, 4]. При этом ориентация в учебном процессе на культуру обучения с опорой на продуктивное сотрудничество с профессорско-преподавательским составом активизирует роль обучающегося как активного субъекта образовательной деятельности, способного к конструированию новых идей и знаний, самообразованию и профессиональному саморазвитию.

Обоснование статуса культуры обучения в качестве императива современного образовательного процесса позволяет обратить внимание на новые аспекты в образовательном процессе:

- учебная деятельность направлена на наращивание объема теоретических и прикладных знаний, формируемых путем актуализации личной мотивации, навыков самообразования и сотрудничества преподавателя и обучающихся;

- она реализуется при решении учебных задач в ситуациях, инициируемых преподавателем с использованием конкретных методов и технологий, а также при разрешении проблемных ситуаций познавательного и исследовательского характера;

- учебная деятельность ориентируется на целостную структуру личности с набором уникальных черт и личностных особенностей обучающегося, проявляющего познавательную активность в учебном процессе;

- учебная деятельность расширяет границы простого усвоения знаний, поскольку опыт решения задач, в том числе творческих, вызывает у обучающихся потребность конструировать, обновлять и совершенствовать знания;

- обучающийся, имея возможность выбирать содержание и формы осуществления учебной деятельности, а также способы организации учебного процесса, реализует себя как активный субъект образовательного процесса.

Современная культура обучения должна основываться на ценностях, сформировавшихся на базе ценностей в военно-учебном заведении, обеспечивать активное участие командного и

преподавательского состава в образовательном процессе, стимулировать их к развитию профессиональных компетенций.

Необходимость ее формирования в военно-учебном заведении, по мнению авторов, обусловлена рядом факторов, позволяющих сделать вывод о существенных изменениях в образовательном процессе и складывании по сути дела новой культуры обучения.

Во-первых, широкое использование современных образовательных технологий индивидуализирует обучение, обеспечивает реализацию инновационных методик в обучении, актуализирует творческий потенциал обучающихся, что требует создания особой обучающей среды. В военно-учебном заведении должна быть сформирована такая культура обучения, которая будет способствовать проявлению индивидуального и коллективного творчества, обмену и распространению знаний внутри такого заведения. Несомненно, что она основана на ценностях непрерывного обучения профессорско-преподавательского состава, повышения их квалификации и формирования профессиональных компетенций. Развитие творчества в данной культуре обучения проявляется в конструктивном анализе идей и концепций, признании особой ценности творческого труда, а также едином для профессорско-преподавательского состава представлении целей и задач вуза.

Во-вторых, с внедрением цифровой образовательной среды пересматриваются не только подходы к образованию и используемые в учебном процессе методы и технологии, но и трансформируется восприятие образования в системе ценностей преподавателей и обучающихся. Применение электронных информационных образовательных ресурсов (электронных учебников, мультимедийных презентаций, средств визуализации учебного контента, средств дополненной виртуальной реальности и т. п.) также расширяет возможности образовательного процесса, позволяет реализовать педагогические принципы в обучении – наглядности, индивидуализации, дифференцированности, создавая почву для личностного и профессионального развития обучающихся и способствуя созданию новой культуры обучения [2].

В-третьих, существенное качественное обновление профессорско-преподавательского состава, в том числе лицами, получившими боевой опыт в условиях вооруженного конфликта, предъявляет повышенные требования и к качеству подготовки военных кадров. Военная практика постоянно наполняется новым содержанием, поэтому система подготовки военных специалистов должна уловить эти изменения, осмыслить и оперативно пересмотреть профессиональные программы обучения.

Кроме того, практика ведения боевых действий, в том числе в ходе специальной военной операции, показала, что состояние военной науки не в полной мере отвечает современным требованиям. Практика боевых действий требует от военной науки разработки новых форм и способов ее ведения. Необходимо не только поднять статус военной науки, но и активизировать исследовательскую, научно-практическую деятельность в области укрепления обороны государства, совершенствовать систему подготовки научно-педагогических кадров.

Основными факторами развития образовательной деятельности военно-учебного заведения должны стать современные подходы к организации учебного процесса и подготовке квалифицированного специалиста и, в первую очередь, новая культура обучения, усматривающая целью вузовского преподавателя – стимулирование слушателей и курсантов к формированию осознанного индивидуального понимания образовательного процесса, что поможет сформировать способность самостоятельно оценивать собственные результаты и повышать за них ответственность. Слушатели и курсанты должны быть обучены умению планировать траекторию своего образовательного процесса, ставить перед собой цели обучения, умело владеть многообразными стратегиями обучения, а также определять наиболее эффективные шаги и препятствия в решении учебных задач.

Важным направлением деятельности профессорско-преподавательского состава при этом должна стать деятельность преподавателей по повышению культурного, интеллектуального уровня слушателей и курсантов, а также успешное усвоение ими учебных дисциплин образовательных программ посредством участия в научной деятельности (военно-научные кружки, кон-

структорские бюро и т. п.) с целью формирования интереса обучающихся к военно-научному творчеству, обучению способам самостоятельного решения научно-технических задач и навыкам работы в научных коллективах, использования творческого и научного потенциала для решения актуальных задач военной науки.

На наш взгляд, техникстское понимание обучения, в котором на первый план выдвигается категория «технология обучения» как совокупность педагогических, дидактических приемов и техник и следование которым приводит к требуемому результату, фактически ограничивает представление об образовательном процессе. По нашему мнению, основой для нового, более широкого взгляда на образование является формирование особой культуры обучения, выдвигающей на первый план такие ценности учебного процесса, как творчество, ответственность за собственный выбор и стремление к профессионализму, позволяющие преодолеть подобную технократическую позицию.

Особое место в формировании культуры обучения в академии принадлежит кафедре профессиональной переподготовки и повышения квалификации педагогических работников образовательных организаций Министерства обороны Российской Федерации.

Сложившаяся на кафедре система организационных и методических требований к проведению занятий, овладение приемами создания современного учебного контента (учебно-методических, дидактических оценочных и других материалов), динамично меняющиеся программы обучения, направленные на профессиональное развитие профессорско-преподавательского состава, значительно повышают вовлеченность, усиливают личностный смысл и мотивацию педагогических работников к продуктивной педагогической деятельности, рост удовлетворенности профессиональным трудом. Важно, чтобы актуализация профессиональных образовательных программ способствовала формированию современной культуры обучения, чтобы новые подходы активно внедрялись в систему профессиональной переподготовки и повышения квалификации педагогических работников, работу всех кафедр и подготовку военных специалистов академии в целом.

Современная культура обучения формируется также через индивидуализацию обучения слушателей, позволяющую им проявить готовность самостоятельно выстраивать маршрут образовательного процесса, определять содержание и интенсивность учебного процесса, активно применять передовые образовательные технологии, участвовать в проектной и научной деятельности, что обеспечивает актуализацию когнитивного и творческого потенциала обучающихся.

Важным элементом формирования современной культуры обучения является использование активных методов обучения. В новой культуре обучения применение современных педагогических практик должно разворачиваться в условиях эффективно выстроенной межличностной коммуникации с ориентацией на достижение целей индивидуальной образовательной траектории обучающихся.

Опыт показывает, что использование современных технологий и методов обучения должно культивировать такие ценностные аспекты образовательного процесса, как положительная устойчивая мотивация к обучению, стремление к плодотворному сотрудничеству, сотворчеству, а зачастую и соавторству с другими участниками образовательного процесса [6]. В этом контексте слушатели групп повышения квалификации в процессе обучения должны проявить свою активную позицию как источник нового, ценного знания.

Актуальной, по нашему мнению, становится исследовательская деятельность, направленная на решение проблемных задач. Высокая степень осознанности, личная вовлеченность обучающихся в процесс научного и творческого поиска позволяют генерировать новое знание и накапливать опыт решения практических задач. В рамках освоения программы повышения квалификации слушатели групп повышения квалификации педагогических работников должны самостоятельно выполнять индивидуальный проект по исследованию и решению проблемы соответствующей предметной области, направленной на создание индивидуального интеллектуального продукта с целью осуществления продуктивной педагогической деятельности.

Разбор учебных кейсов при активном участии слушателей групп повышения квалификации и качественная обратная связь профессорско-преподавательского состава побуждают обучающихся к формированию личностного, ценностного отношения к новому знанию, обновленному личному опыту. Грамотно организованный разбор профессионально-ориентированных практических заданий также содействует развитию у обучающихся чувства причастности к конструированию профессионально значимого нового знания.

Как было уже отмечено, значительную роль в формировании современной культуры обучения играют цифровые технологии. Долгие годы в образовательных учреждениях в учебном процессе использовались различные аудиоустройства, видеофильмы, диапроекторы и проекционные аппараты, которые со временем были заменены современными компьютерными технологиями. Успешное внедрение цифровой образовательной среды в образование обуславливает необходимость поиска современных подходов к учебному процессу. Активное использование электронных учебных изданий, виртуальных практикумов, мастерских, лабораторий и других электронных средств обучения позволяет преподавательскому составу самостоятельно конструировать учебный процесс – определять учебные задачи, индивидуальный выбор методов и приемов обучения, арсенал педагогических инструментов и технологий решения практических задач.

В результате образовательная деятельность в военно-учебном заведении приобретает новые качественные черты. Чтобы успешно решать актуальные образовательные задачи, необходимо формировать современную культуру обучения, ориентированную на индивидуальное развитие обучающихся, индивидуальный опыт формирования знаний и применения их в профессиональной деятельности специалиста. Спецификой современной культуры обучения становятся организация совершенно нового активного учебного пространства, изменение роли преподавателя и обучающегося, их эффективное сотрудничество и сотворчество, использование активных методов обучения и цифровых платформ, соответствующих новым задачам и целям образования.

Список используемых источников

1. Алмазова И. Г. Педагогическая культура как объективный общекультурный процесс и личная профессионально-педагогическая культура учителя // Культура в фокусе научных парадигм. – 2017. – № 5. – С. 333–337.
2. Герасимова Е. К. Цифровизация образования: от теории к практике : учеб. пособие. – М. : Знание-М, 2022. – 155 с.
3. Иноземцева Л. А., Кужекин Н. С. Акмеологические инварианты в структуре профессиональной компетентности преподавателя военно-учебного заведения // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 684. – С. 274–278.
4. Иноземцева Л. А., Кужекин Н. С. Динамика системы познавательной мотивации в процессе становления преподавателя военно-учебного заведения // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2023. – Вып. 687. – С. 262–266.
5. Крылова Н. Б. Культура учебной деятельности // Школьные технологии. – 2002. – № 1. – С. 224–232.
6. Панфилова А. П. Инновационные педагогические технологии : Активное обучение. – М. : Издательский центр «Академия», 2013. – 192 с.
7. Тырина М. П. Культура обучения как предмет психолого-педагогических исследований // Мир науки, культуры, образования. – 2011. – № 1(26). – С. 255–258.

С. А. Мусиенко

кандидат военных наук, доцент

ВХОДНОЙ КОНТРОЛЬ УРОВНЯ ОБУЧЕННОСТИ КАК НОРМАТИВНО-ДИДАКТИЧЕСКАЯ ДЕТЕРМИНАНТА СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ ПЕДАГОГИЧЕСКИХ РАБОТНИКОВ

В публикации рассматриваются актуальные проблемы разработки технологий проектирования образовательного процесса. Акцентируется внимание на входном контроле обученности обучающихся по программам повышения квалификации. Автор обосновывает входной контроль уровня обученности как нормативно-дидактическую детерминанту совершенствования процесса повышения квалификации педагогических работников. Особое внимание уделено применению таких технологий обучения, которые позволяют реализовать принцип дифференцированного и индивидуального подхода в обучении, что предполагает прежде всего изучение обучающихся, выявление их особенностей, возможностей, исходного уровня обученности и готовности успешно осваивать требуемые образовательные программы.

Ключевые слова: образование, дополнительное образование, дополнительная профессиональная программа, входной контроль, тест, детерминанта, компетенции, технология обучения, занятия практической направленности, проектная работа

Вследствие существенного усложнения задач, решаемых на современном этапе отечественными Вооруженными силами, особенно остро встала задача качественной перестройки всей системы подготовки военных кадров. Требуются новые подходы в обучении и воспитании выпускников военных вузов с учетом сложившихся реалий в условиях выполнения задач в ходе СВО, готовности противодействовать агрессивной политике коллективного Запада. Актуальной задачей стало разрешение существенных противоречий между сложившейся системой военного образования и современными требованиями к уровню подготовки офицерских кадров. Решение этих задач в значительной степени зависит от уровня мастерства педагогических работников, что требует, в свою очередь, непрерывной, активной, целенаправленной деятельности преподавателей по овладению вершинами профессионализма. Наряду с самообразованием, самосовершенствованием значительная часть такой деятельности реализуется в системе дополнительного профессионального образования, построенной на строгой и выверенной организационной и правовой основе. Поддержание требуемого уровня профессиональной компетентности профессорско-преподавательского состава обеспечивается прежде всего правом повышения квалификации в системе дополнительного образования. Такое право с периодичностью не реже одного раза в три года предоставляется федеральным законом № 273 «Об образовании в Российской Федерации» (статья 47). Возможно, это может выглядеть парадоксально, так как если здесь речь идет о праве педагога, то в статье 48 указанного закона директивно предписывается обязанность профессорско-преподавательского состава систематически работать над повышением своего профессионального уровня.

В системе военного образования, в соответствии с приказом министра обороны Российской Федерации 2022 года «О сети и емкости организаций Министерства обороны Российской Федерации, осуществляющих деятельность по дополнительным профессиональным программам», повышение квалификации военных специалистов проводится не реже одного раза в пять лет, а педагогических работников – не реже одного раза в три года. [1]

Следует отметить, что требования, предъявляемые к организации и функционированию системы повышения квалификации педагогических работников образовательных организаций Министерства обороны Российской Федерации, в настоящее время существенно возросли, что обусловлено рядом причин. Прежде всего – быстрым устареванием информации в области образования, его цифровизацией, внедрением в образовательный процесс инфор-

мационно-коммуникативных технологий (ИКТ). Отдельное значение приобретает активное развитие военной практики (наличие региональных конфликтов; появление новых видов вооружения и военной техники), морально-психологического обеспечения ведения боевых действий и т. д. Преподавательский состав высшей военной школы должен быть в полной мере готовым к участию в президентской программе «Кадры», реализация которой направлена на социальную поддержку участников СВО, в том числе в вопросах образования.

Повышение квалификации педагогических работников – это прежде всего обновление теоретических знаний, совершенствование их умений и навыков в связи с постоянно повышающимися требованиями к квалификации преподавателя высшей школы. Оно реализуется в рамках дополнительного профессионального образования (далее ДПО), основная цель которого заключается в получении и (или) совершенствовании профессиональных компетенций. [2]

В современных условиях формирование новых компетенций или квалификаций преподавателей высшей военной школы осуществляется посредством реализации программ профессиональной переподготовки. А в ходе освоения программ повышения квалификации совершенствуются компетенции профессорско-преподавательского состава с учетом новых достижений в психолого-педагогической науке, актуальных проблем в области науки, информационных образовательных технологий и передового опыта воспитания обучающихся.

Как правило, учебные группы для обучения по программам повышения квалификации комплектуются из числа опытных, достаточно подготовленных военных специалистов. Однако и они зачастую обладают различными научной квалификацией, опытом педагогической и служебной деятельности. Немаловажную роль играет здесь различие в возрасте, воинском звании, наличии войскового опыта и т. д. А в таких учебных группах, как, например, группа повышения квалификации начальников кафедр и их заместителей существенными становятся и особенности профильной кафедры. Это могут быть кафедры военно-специальные или гуманитарные, общепрофессиональные или выпускающие. На кафедрах могут реализовываться образовательные программы адъюнктуры, специалитета, среднего профессионального образования.

Отмеченные обстоятельства указывают на необходимость реализации принципа дифференцированного и индивидуального подхода в обучении, что предполагает в первую очередь изучение обучающихся, выявление их особенностей, возможностей, исходного уровня обученности и готовности успешно осваивать требуемые образовательные программы.

Детерминантами определения актуального содержания преподаваемых учебных дисциплин, выбора образовательных технологий, методов обучения, методических приемов является уровень подготовленности обучающихся, область их научных интересов, опыт служебной и практической деятельности.

С моей точки зрения, наиболее эффективным средством решения данной проблемы является входной контроль уровня обученности слушателей группы повышения квалификации. Он проводится образовательной организацией, с одной стороны, с целью определения способности освоения обучающимися учебных дисциплин, модулей, разделов дополнительной профессиональной программы, исходя из уровня их подготовленности и опыта педагогической и служебной деятельности, а с другой – с целью такого входного контроля, который может быть нормативно-дидактической детерминантой совершенствования программ повышения квалификации путем внесения изменений, выбора технологий обучения, позволяющих достичь желаемого результата. Исходя из этого обстоятельства, к содержанию входного контроля предъявляются строгие требования организационного и дидактического характера.

Ориентируясь на направленность программ повышения квалификации педагогических работников содержание входного контроля обусловлено, главным образом, содержанием компетенций, которыми должен владеть преподаватель высшей военной школы.

Следует отметить, что достижение объективной комплексной оценки степени сформированности компетенций педагогических работников требует разработки и непрерывного совершенствования соответствующих фондов оценочных средств педагогической диагностики, содержания и форм контроля и оценки качества их подготовки. Сложность и некоторые трудности в определении содержания и формализации входного контроля, разработка рекомендаций по внедрению соответствующих педагогических технологий не нашли на сегодняшний день окончательного обоснования и решения.

Вместе с тем можно говорить о положительном опыте, накопленном в ряде военно-учебных заведений. Интерес может представлять опыт кафедры подготовки и повышения квалификации педагогических работников Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского по организации и проведению входного контроля, а также по использованию его результатов в образовательной деятельности, направленной на совершенствование компетенций профессорско-преподавательского состава. Учитывая отсутствие жестких нормативных предписаний в этом направлении, преподаватели кафедры ведут постоянный творческий поиск новых форм ведения входного контроля.

Опыт показывает, что, как правило, входной контроль проводится по результатам собеседования или тестирования. Кроме того, ему предшествует серьезная подготовительная работа.

Проектирование тестовой технологии входного контроля степени сформированности компетенций педагогического работника можно представить в виде сложного многоуровневого процесса, включающего несколько взаимообусловленных этапов. Содержательной основой входного контроля выступают профессиональные компетенции преподавателя. При этом разработчики ориентируются и на требования Министра обороны РФ по порядку проверок военных профессиональных образовательных организаций и военных образовательных организаций военного образования МО РФ. В ходе таких проверок профессиональная деятельность преподавательского состава оценивается по двум показателям. Прежде всего, в соответствии с установленной методикой, подвергается контролю учебное занятие, проводимое преподавателем согласно тематическому плану изучения дисциплины и расписанию занятий. Второй показатель определяет уровень подготовленности профессорско-преподавательского состава в области знаний основ военной педагогики и психологии и законодательства в области системы образования, а также предметного содержания преподаваемой дисциплины [3].

После решения проблемы содержания, в качестве следующего этапа работы преподавателей выступает формализация входного контроля. В первую очередь разработчикам тестов входного контроля целесообразно определиться с видом тестов. В отечественной и зарубежной литературе в зависимости от основания представлены различные классификации тестов. Так, например по основанию интерпретации, нормативно-ориентированные тесты дают возможность осуществлять сравнительный анализ учебных достижений обучающихся. В этой же области находятся критериально-ориентированные тесты, позволяющие выявить уровень остаточных знаний курсантов или слушателей. [4]

Выбор теста зависит от избранной целевой установки. Кроме входного тестирования к ним относятся формирующее (диагностическое) тестирование, позволяющее вести мониторинг индикаторов достижения требуемых компетенций, а также итоговая аттестация, в ходе которой оцениваются соответствие уровня подготовки выпускников установленным требованиям и готовность их к выполнению профессиональных задач по предназначению.

По степени однородности решаемых задач тесты могут быть: гомогенными (однородные по содержанию) и гетерогенными (измеряющие несколько переменных). Последние тесты делятся на полидисциплинарные и междисциплинарные.

По характеру измеряемых переменных существуют тесты для оценки знаний, умений, навыков и так называемые компетентностные тесты. В соответствии с формой предъявления

тестов их делят на устные, письменные, компьютерные. Выбор вида теста зависит от многих факторов как объективного, так и субъективного характера. [3]

Для индивидуального собеседования с обучающимися наиболее опытными педагогами кафедры подготовки и повышения квалификации педагогических работников разрабатывается перечень вопросов, который обсуждается на заседании кафедры и утверждается заведующим кафедрой. Индивидуальное собеседование позволяет в ходе общения выяснить не только уровень подготовленности обучающихся, но и сосредоточить внимание преподавателей кафедры на теоретических и практических проблемах, актуальных для слушателей. Это позволяет профессорско-преподавательскому составу вносить коррективы в содержание учебных занятий, выбирать оптимальные технологии обучения.

Подчеркнем, что проведение входного контроля не является самоцелью или строгим выполнением требований руководящих документов. Как уже отмечено автором, результаты входного контроля реализуются в различных образовательных программах. Так, например, преподаватели учебной дисциплины «Нормативные правовые основы системы образования», как правило, посвящают отдельное занятие рассмотрению результатов анализа входного контроля. На таком занятии может осуществляться либо совместное обсуждение со слушателями каждого из вопросов теста с комментариями и аргументацией, либо акцентирование внимания только на тех вопросах, по которым у значительного количества обучающихся были ошибки или затруднения. Последние из указанных вопросов, как правило, более детально рассматриваются в соответствующих темах учебной дисциплины на лекциях, семинарах, практических занятиях. Более того, если появляется необходимость дополнительного изучения ряда вопросов, установленным порядком вносятся изменения в тематический план изучаемой дисциплины и планы проведения учебных занятий. Важным моментом при этом становится выбор таких технологий обучения, которые обеспечат достижение конкретных целей.

Как известно, классическими видами учебных занятий в военном вузе являются лекции и занятия практической направленности (семинары, практические занятия, групповые упражнения и т. д.). У педагогов, ведущих занятия в системе дополнительного профессионального обучения появляются новые возможности достижения образовательных целей путем применения различных видов занятий научно-исследовательской направленности.

Так, слушатели группы повышения квалификации начальников кафедр и их заместителей в рамках учебной дисциплины «Современные технологии планирования, организации и контроля образовательной и методической деятельности кафедры» выполняют проектную работу. Обучающиеся обязаны на основе знаний, приобретенных в ходе обучения, выполнить исследование учебно-методического характера. Выбор темы слушателями осуществляется самостоятельно, как правило, исходя из актуальных задач конкретной педагогической практики.

Обучающимся предлагается следующая тематика проектных работ.

1. Технология подготовки и использования электронных учебно-методических материалов для проведения лекций.
2. Технология разработки электронных дидактических материалов для проведения учебных занятий практической направленности.
3. Психолого-педагогические принципы визуализации учебной информации в образовательном процессе.
4. Педагогические условия применения информационных технологий при проведении занятий по преподаваемой учебной дисциплине.
5. Информационные средства обучения, применяемые при проведении учебных занятий по профильной кафедре.
6. Информационно-аналитическое обеспечение моделирования содержания и методики преподавания профильной дисциплины.

7. Обоснование выбора методических приемов проведения различных видов занятий в зависимости от индикаторов достижения компетенций.

Выполненная слушателем проектная работа проходит процедуру рецензирования научным консультантом, а затем проводится публичная защита работы на кафедре. Обучающиеся должны продемонстрировать уровень сформированности риторической компетентности, степень достижения цели проектной работы и возможности использования ее результатов в практической деятельности преподавателя профильной кафедры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные примеры являются лишь частью накопленного на кафедре опыта актуализации программ повышения квалификации работников. Он может быть использован и при повышении квалификации в группах слушателей других специальностей. Практика организации и проведения входного контроля как нормативно-дидактической детерминанты совершенствования подготовки преподавательского состава в ходе освоения дополнительной программы повышения квалификации показала его эффективность.

Список используемых источников

1. Об образовании в Российской Федерации : федер. закон от 29 дек. 2012 г. № 273-ФЗ [с изм. и доп. вступил в силу с 1 февр. 2023 г.]. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_140174_ (дата обращения: 19.05.2024).
2. Психология и педагогика высшей военной школы : электрон. учеб. пособие / Н. А. Репях [и др.]. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2016. – 248 с.
3. *Аванесов В. С.* Форма тестовых заданий. – М. : Центр тестирования, 2005. – 156 с.
4. Технологии профессионально-ориентированного обучения : учеб. пособие / И. Ю. Воронков [и др.]; под ред. Н. С. Кужекина. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2017. – 140 с.

О. В. Гуторович,
кандидат философских наук, доцент

ПРОБЛЕМА ТЕХНОСФЕРЫ И ЕЕ ЭВОЛЮЦИИ В КОНТЕКСТЕ ПРОГРАММЫ КОСМИЧЕСКОЙ ИНДУСТРИАЛИЗАЦИИ К. Э. ЦИОЛКОВСКОГО

Интерес исследователя связан с проблемой освоения космического пространства и его индустриализацией, предложенной в трудах теоретика и практика космонавтики К. Э. Циолковского. В статье представлена эволюция технической сферы, анализ каждого ее этапа. Характеристика включает описание последовательных успехов человека в ходе реализации идеи освоения Земли, Солнечной системы, других звездных систем, а также особенностей созданной человеком искусственно-природной реальности. Внимание уделяется условиям научно-технических преобразований, их возможным последствиям, а также взаимосвязи развития техносферы и социума.

Ключевые слова: К. Э. Циолковский, Вселенная, космическая индустриализация, техносфера, технобиозносы, технизм, прогресс, атом-дух, эфирные поселения.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема развития техники привлекала внимание К. Э. Циолковского на протяжении всей его жизни. Техническая сфера, представляющая собой составную часть общества, не просто вписывалась в концепцию будущего, она рассматривалась как локомотив, оказывающий существенное влияние на социальное развитие всего человечества. Потенциал техники позволял рассуждать о ее воздействии на развитие общества, усложнение всех его составляющих элементов, включая общечеловеческую культуру. Технический прогресс позволял шагнуть в космос, приступить к его освоению. «Небесное пространство, – писал философ, – беспредельно и вполне достижимо для жителей Земли и их бесчисленных потомков, энергия солнц громадна, и масса веществ невообразима» [1, с. 257]. Данные слова не потеряли своей значимости и в наши дни.

Обосновывая сегодня необходимость освоения космоса, современные исследователи называют целый ряд причин. Среди них – открытие новых технологий, использование иноземных ресурсов, перемещение вредных производств за пределы Земли, решение вопросов го-сударственной безопасности за счет создания сети навигационных, коммуникационных спутников и спутников наблюдения и др. Актуальность данной проблемы не вызывает сомнения.

В предлагаемой статье речь пойдет о технике: условиях, эволюции и перспективах ее развития, использовании при решении основной задачи, стоящей перед человечеством, – индустриализации космического пространства, а также о сопутствующих этому процессу явлениях и последствиях.

ПРОГРАММА КОСМИЧЕСКОЙ ИНДУСТРИАЛИЗАЦИИ И ВОЗМОЖНЫЕ УСЛОВИЯ И ПОСЛЕДСТВИЯ ЕЕ РЕАЛИЗАЦИИ

Над программой космической индустриализации К. Э. Циолковский начал работать с 70-х годов XIX века. Ее цель состояла в освоении космического пространства и в качественном совершенствовании жизни человека. Мыслитель возлагал огромные надежды на уникальные способности человеческого разума, который мог бы обеспечить реализацию данных задач. Будущее связывалось с человеческой мыслью, производящей блага и гарантирующей прогресс.

В трудах философа человек сравнивался с природой. Он есть «произведение природы и ее часть» [1, с. 200]. Такое сопоставление позволяло сделать вывод, что если природа наделена творческой силой, то и человеку она присуща. Это его сущностный признак. Человек-творец, наделенный высшим разумом, имеет возможность вмешаться в ход развития природы. Если естественное творение отличается размеренностью, то высшему разуму под силу его ускорить [1, с. 200].

Космическая философия К. Э. Циолковского предполагала совершенствование индивидуальной жизни и общественного устройства землян, составляющих фундамент для развития науки и техники. Рисуя картины будущей социальной жизни, философ придавал большое значение изменению в лучшую сторону всей законодательной базы человечества, способной обеспечить свободу и единение всех народов Земли. «Единая власть над Землей» [1, с. 196] гарантирует общий язык и необходимые меры для улучшения благосостояния людей. Вместо войн и самоистребления человек сможет ориентироваться на саморазвитие, усиленное «размножение, руководимое знанием» [1, с. 198] и борьбу с враждебными силами природы. Результатом такой социальной политики должно стать качественное совершенствование населения. Речь идет не только о физических изменениях, большую роль играют вопросы нравственности, а также умственные характеристики. Разумная политика даст «тучи гениев и даровитых людей» [1, с. 198], что приведет к познанию всей Земли и Вселенной, обеспечив социуму «большее благо». Человечеству нужны «Ломоносовы, Ньютоны, Лапласы, Гауссы, апостолы ума и нравственности» [2, с. 23]. Их знания помогут сделать человека богатым, счастливым и свободным. Развитие образования и распространение знаний, в свою очередь, откроют невероятные возможности для технического прогресса, приведут к совершенствованию промышленной сферы.

В статье «Будущее Земли», написанной в 1927 году, К. Э. Циолковский предполагал, что разумное общественное устройство позволит произвести дальнейшее преобразование Земли, включающее реализацию семи основных задач. Они предусматривали [1, с. 200–201]:

- 1) распространение и углубление знания;
- 2) улучшение благосостояния всего населения планеты;
- 3) значительное увеличение жителей Земли, с целью установления господства на всей планете;
- 4) безболезненное уничтожение животных и усовершенствование растений;
- 5) качественное совершенствование человеческой породы;
- 6) господство человека над природой, предполагающее освоение пустыни и просторов океанов, изменение состава атмосферы, развитие технической сферы, а также достижение высочайшего могущества в этой области;
- 7) освоение и колонизацию Солнечной системы совершенными потомками человека.

В постановке указанных задач просматриваются крайний утилитаризм и технизм. Отчасти такой подход объясняется опасностями разного рода, с которыми человечество может столкнуться в будущем. К. Э. Циолковский описывает катастрофические сценарии, реализация которых ведет к неизбежному концу всего живого на Земле. Среди них – столкновение планеты с метеоритом или кометой, угасание и охлаждение нашего Солнца, землетрясения и наводнения, разрушающие целые города, повышение температуры атмосферы Земли вследствие непредвиденных причин, взрыв Земли в результате накопления внутри нее упругой материи и многое другое. Следует учитывать и увеличение численности населения планеты. Так, прирост числа жителей земного шара на 1% в год ведет к увеличению населения в 1000 раз через 1000 лет. Философ задается вопросом: «Куда же тогда деваться этому роду?» [1, с. 117]. Можно также поговорить «о той гадкой жизни, которую все мы испытываем непрерывно» [1, с. 154].

Каждое событие, приведенное в качестве примера, является основанием для активизации человеческой мысли, ее направленности на решение данных проблем. С наукой и техникой связываются надежды на изменение и подчинение природы. Предполагается, что человеку

удастся не только заставить природу работать с выгодой на себя, но и осуществить преобразование Земли. В дальнейшем это станет фундаментом для решения главной задачи, стоящей перед человечеством, – индустриализации космического пространства. То есть научно-технические преобразования изначально должны повлечь за собой эффективное использование всего пространства земного шара и его природных богатств, затем привести к освоению ресурсов Солнечной системы и других звездных систем.

ПРОБЛЕМА ЭВОЛЮЦИИ ТЕХНОСФЕРЫ: ЭТАПЫ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКА

В творчестве К. Э. Циолковского представлена *эволюция техносферы*, которая в своем развитии проходит ряд этапов. Эволюционный аспект техники зафиксирован и детально проработан в трудах философа. Каждый этап подробно охарактеризован.

Так, с точки зрения ученого, современное состояние технической базы не представляется совершенным. Уровень техники и производства находится в зачаточном состоянии. Перспективные технологические идеи и связанные с ними технические изобретения только начинают внедряться в жизнь человеческого общества. Вместо эффективного и продуманного расположения производства просматривается хаотичное распределение без учета природных особенностей местности. Энергетическая промышленность плохо развита, как следствие, основной источник энергии – энергия Солнца – используется крайне нерационально. Просматривается прямая зависимость низкого уровня развития технической сферы и образа жизни человека начала XX века. Несовершенство человеческого общества исключает взвешенные решения по планированию и качественному изменению промышленной сферы. Низкий уровень развития политической сферы и отсутствие тесных межгосударственных связей не способствуют интеграции и созданию органа, координирующего совершенствование науки и техники в планетарном масштабе. В связи с этим невозможно говорить о продуктивных решениях, принимаемых в целях расширения научно-технической сферы. Нет оснований и для решения целого ряда проблем, среди которых проблема взаимоотношения природы и общества, проблема природных и техногенных катастроф, проблема демократизации общества на базе формирования мощной производственно-технологической сферы.

Предлагаемое описание современного общества напоминает эпоху натурального хозяйства. В работе «Горе и гений», написанной К. Э. Циолковским в 1916 году, философ описывает современные поселения. Возникают картины нищеты, заброшенности и отсталости. «Дома грязны, пыльны, полны насекомых, бактерий, миазмов» [2, с. 27]. Жизнь человека сопровождаются тяжелый труд, заботы и тревоги. Его изнуряют «возня со скотиной, мучительные заботы о детях, отсутствие врачебной помощи, трудность обучения, непродуктивный труд» [2, с. 27].

Вера в счастливое будущее, в котором вместо материальной нужды и горестей человек создает все необходимые условия для своего счастливого и комфортного проживания, дает К. Э. Циолковскому основание для полета фантазии. Уже в рамках *первого этапа* программы индустриализации космоса и становления нового общества начнется активное развитие человека, науки и техники. Локомотивом интенсивных изменений выступит техническая сфера. Машинное производство увеличит производительность труда. Труд станет безвредным и безопасным, обеспечит свободное время, создав тем самым условия для новых открытий и свершений. Преобразование техносферы предполагает создание крупного промышленного производства. Сложные фабрики будут размещены «в полярных областях или на горах», «в местах падения воды или других источников силы» [1, с. 170]. Все силы природы должны быть привлечены и поставлены на службу человеку «в качестве рабов». Технический прогресс обеспечит освоение богатств, находящихся в недрах Земли, позволит превратить пустыни в оазисы, решит проблему использования Мирового океана. Человечеству предстоит

сначала покрыть его искусственными плодородными площадями, затем осушить и эксплуатировать морское дно в своих целях.

К концу данного этапа техносфера, включающая технику, промышленную застройку и всё, что создано человеком при помощи техники, будет характеризоваться монолитностью, тесной взаимосвязью всех ее подсистем. На смену иррациональным тенденциям придет рационализм, который человек сможет использовать для создания искусственной среды с максимально выверенными параметрами, позволяющими вести достойный образ жизни. Изменения коснутся и социальной сферы. Появятся «дворцы технического, научного, социалистического и нравственного просвещения» [1, с. 167]. Человечество устремится к сотрудничеству, в результате чего произойдет объединение локальных цивилизаций, сформируется мировое правительство.

Всё вышеперечисленное можно рассматривать в качестве условий для преобразования биосферы, которой суждено стать регулируемой и контролируемой. Биосфера преобразуется в биотехносферу – искусственную среду с заданными характеристиками, в которой отсутствует Мировой океан, естественная атмосфера заменена искусственной, наблюдается повсеместное заселение всей планеты, возрастает мощность научно-технического и промышленного комплекса. Научно-технический и промышленный комплекс характеризуется экономичностью, специализацией и масштабностью.

Философ рисует картину, в которой техника переработает среду обитания человека. Речь не идет о гармонии искусственного и естественного. *Технике суждено изменить параметры биологического мира.* Изменению подвергнется враждебное, опасное, бессмысленное или примитивное. Трансформации внесут вклад в создание искусственных ландшафтов, где «все красиво, чисто, неразрушаемо и гигиенично» [1, с. 169]. В данную логику укладывается идея безболезненного уничтожения насекомых, высших животных и вредных растений. Но при этом возникает ряд вопросов: дает ли философ какие-либо разъяснения по данному вопросу? как такое решение коррелирует с представлениями об экологическом балансе на земле, а также с представлениями человечества о гуманности в отношении всего живого?

Ответы на эти вопросы можно найти в двух статьях К. Э. Циолковского, написанных в 1923 году. Интерес представляют работы «О душе, о духе и о причине» и «Живая Вселенная». В них изложена *теория атома-духа*, которую следует рассматривать в качестве фундаментального основания всей философии ученого. В соответствии с данной теорией все живые формы – человек, животные и растения – представляют собой некое сочетание атомов. Атом-дух характеризуется не только тем, что составляет их основу и является конечным носителем жизни, он бессмертен по своей сути, из чего следует, что ни одна частица жизни не может быть уничтожена. «Материя, уже расстроенная смертью может снова возникнуть через некоторое время, иногда через миллиарды лет, в том же или более совершенном виде» [3, с. 42]. Исходя из этого не следует подвергать жесткой критике приверженность К. Э. Циолковского техницизму и утилитаризму и упрекать его в антигуманизме. Описываемые идеи оправданы верой в жизнь, в то, что ее нельзя уничтожить. В них угадывается сходство с буддийскими представлениями о мире. Философ убежден, что все планеты, включая Землю, следует «привести к порядку, чтобы они не были источником мучения для атомов, живущих в несовершенных существах» [1, с. 209]. Только в этом случае совесть человека может быть спокойна, только в этом случае любые муки живого будут прекращены. Право содержать отдельные виды животных, наблюдать, изучать и заботиться о них должно быть сохранено лишь за научными учреждениями. Вряд ли ученого можно обвинить и в непонимании необходимости соблюдения экологического баланса на планете. Развитие науки поставит все естественные процессы под контроль. «Человек станет господином Земли, воды, воздуха, растений и животных» [4].

Уже описание первого этапа становления нового общества позволяет говорить *об изменении отношений между техническим миром и природной средой.* Происходит постепенное сближение, а в конечном итоге и сращивание искусственного и природного миров, появля-

ются *технобиоценозы*, которые можно рассматривать в качестве *сущностной характеристики нового общества*. Модель окружающего мира меняется, создается единая искусственно-природная реальность, в которой существуют гигантские научно-промышленные комплексы, новейшие технические сооружения и полностью преобразованный искусственный ландшафт. Достаточно фантастично выглядят идеи, связанные с исчезновением лесов, гор, Мирового океана; заменой атмосферы тонким слоем воздуха; созданием герметичного пространства с искусственно регулируемой температурой и определенным составом газообразной среды. Однако данные картины нельзя воспринимать как негативные последствия развития научно-технической мысли: разрыв человека с природным миром спланирован и продуман. Описываемые последствия ожидаемы. Функции и назначение технобиоценозов определены. В предлагаемой картине последовательных успехов человечества естественное и искусственное тесно переплетаются, поэтому изобретение реактивного двигателя воспринимается в качестве совершенствования движения как способа существования материи. Природные процессы не отменяются, а дополняются и совершенствуются по воле человека в ходе его научной и изобретательской деятельности.

Все преобразования, осуществляемые на планете, рассматриваются в качестве фундамента для распространения могущества человека в Солнечной системе. И если в рамках первого этапа программы индустриализации космоса и становления нового общества решались задачи по освоению планеты Земля, то *второй этап* предусматривает смещение всех задач в сторону *освоения космического пространства*, где с течением времени человеку предстоит развернуть искусственный технобиотический мир. Складывается впечатление, что творческая фантазия и рациональность человека беспредельны. Его ждет впереди создание технологий, способных преодолеть невесомость, наличие космического излучения, значительный перепад температур и отсутствие атмосферы. Назревает необходимость с учетом физики космоса внести коррективы в технические характеристики транспортных средств, в результате чего человеческий разум сможет приспособить свои изобретения к искусственной гравитации, огромным скоростям и расстояниям.

Описание нового мира представлено в научно-фантастической повести «Вне Земли», включающей 58 глав. Работа над ней продолжалась больше двадцати лет и завершившись к 1920 году. Из вымышленного диалога великих ученых Ньютона, Галилея, Лапласа, Гельмгольца и Франклина мы узнаем о преимуществах и недостатках жизни в космическом пространстве. В качестве позитивных моментов рассматриваются значительные скорости, возможность перемещения на большие расстояния, отсутствие трения, воздуха и силы тяжести. Условия существования человека изменяются. Они исключают холод и снег, метели и жару, сырость и туманы, циклоны и ветры, многое другое. Осваивая пространство вокруг Земли, человек увеличивает свои возможности по использованию энергии Солнца в 1000 раз, что позволяет ему развивать самую разнообразную промышленность. Заводские работы направляются на «сваривание металлов, выделение металлов из руд, ковку, литье, прокатку и т. д.» [1, с. 170]. При этом человеку не стоит забывать о том, что даже незначительное повреждение жилого помещения грозит ему гибелью в безвоздушном пространстве.

Следует отметить, что сами *контуры модели промышленного освоения космоса* были намечены в трудах «Свободное пространство» (1883) и «Грёзы о Земле и небе и эффекты всемирного тяготения» (1893). Именно в этих работах обосновываются возможность и необходимость вовлечения внеземной природы в производственную сферу, а также определяются основные направления деятельности человека по реализации данной задачи. Пылливому уму гениев предстоит создать и ввести в эксплуатацию внеземные сооружения, предназначенные для жизни и производственной деятельности, овладеть энергией солнечного излучения и использовать ее в дальнейшем на собственные нужды. Творческие инновации человека распространяются на освоение и использование в промышленных целях вещества астероидов и спутников планет, на монтаж и сборку в космическом пространстве крупногабаритных конструкций, на возведение и внедрение в эксплуатацию баз различного назначения на Луне.

Постепенно раскрывается масштаб предстоящей деятельности человека, связанный не просто с внедрением в космическое пространство, а с созданием вне Земли благоприятных условий для проживания. В этой связи, например, поднимается проблема разработки и производства оранжерей – особого типа сооружений, предназначенных для выращивания фруктов и овощей, с встроенными «регуляторами температуры, влажности, удобрения и состава газообразной среды» [1, с. 40], а также с отсутствием вредных бактерий и паразитов. Вместе с тем К. Э. Циолковский уделяет внимание самым разнообразным вопросам: как и чем будет дышать человек, каким требованиям должны отвечать жилые сооружения и способы передвижения в них, какие правила должен соблюдать человек во время работы с техникой или в ходе совместного проживания и пр. [1, с. 129–154].

Развернутый человеком в космосе технобиотический мир демонстрирует возможности пытливого разума, способного от преобразования Земли перейти к преобразованию планет и астероидов, решить проблему невозобновляемых и ограниченных ресурсов и реализовать идею массового заселения космического пространства. Рационалистический подход просматривается во всём: в использовании энергии солнечного ветра, в эксплуатации системы зеркал, спроектированной для создания определенной температуры для самых разнообразных сфер производства, в рассчитанных параметрах (размер, вес, хрупкость) космических сооружений, в экономичном подходе при строительстве эфирных поселений. Превалирует принцип минимума затрат при максимуме эффекта. Его реализация просматривается даже при планировании космических жилищ. Так, ученый обосновывает необходимость выбора для проживания помещения «неопределенно великой длины» цилиндрической формы с диаметром в 2–3 метра со слабым вращением внутри для получения тяжести и с непрерывной фильтрацией воздуха. Методично объясняется, что жилище со значительным диаметром дает незначительное количество света на единицу объема, а с маленьким поперечником ограничивает простор и стесняет движения [1, с. 131]. Вращение же позволяет удерживать почву от рассеяния, способствует устойчивости жилища и удовлетворяет надобность человека [1, с. 159]. Заданному принципу отвечает и внутренняя структура жилища, поэтому жилые космические комплексы предполагают наличие различных помещений, при заселении которых учитываются возраст, пол, семейные отношения, интересы и потребности каждого человека [1, с. 162].

С течением времени влияние техносферы на развитие самого человека и условий его существования существенно возрастет. Техносфера обеспечит строительство искусственных жилищ между орбитами Марса и Земли, а также дальше от Солнца, приведет к росту человечества в несколько миллиардов раз, что стимулирует дальнейшее освоение космического пространства.

Третий этап программы индустриализации космоса не ограничивается во времени. Философ не определяет границы развития техносферы. Предполагается, что данный этап будет длиться бесконечно долго. В рамках данного этапа просматриваются *две перспективы*. С одной стороны, *продолжится научно-техническое развитие*, с другой стороны, *не исключается эволюция самого человека*. Речь идет о биологических изменениях, в результате которых человек трансформируется в космическое существо [5, с. 286–304]. «Космический» человек – это усовершенствованный в будущем земной человек, приспособленный «к равной тяжести, разным атмосферам, к жизни в пустоте, к жизни без пищи и т. д.» [4]. Более того, источником жизни такой «породы» человека может стать только лучистая энергия [4]. Циолковский убежден, что «если минералы преобразились в человека, то как же человеку не избавиться от своих недостатков и не достигнуть высшей формы» [4]. По его мнению, автоэволюция кардинально перестроит генотип человека.

В размышлении ученого о будущем человека смущает выражение «порода людей». Терминология достаточно спорная, заставляющая вспоминать евгенические теории. В качестве противовеса таким рассуждениям следует привести аргумент, что большинство произведений философа проникнуто заботой о здоровье и интеллектуальном могуществе всего челове-

чества, кроме того, необходимо сослаться на использование им несовершенной терминологии.

Несмотря на дискуссионность данного вопроса, в нем просматривается оптимизм, распространяющийся, в частности, на техносферу, которая за миллионы и миллиарды лет способна существенно измениться. Особое внимание ученых обращает на средства сообщения. Развитие транспортных средств будет направлено в сторону создания реактивного двигателя. Идеей реактивного движения К. Э. Циолковский заинтересовался еще в 1883 году. Спустя десять лет, в 1903 году, он опубликовал работу «Исследование мировых пространств реактивными приборами». В ней приводятся неопровержимые математические доказательства возможности преодоления силы земного тяготения на аппарате ракетного типа [6]. Предполагается, что благодаря реактивным двигателям полеты за атмосферу превратятся в повседневное дело. У человека появится возможность преодолеть воздушную оболочку Земли, проникнуть в космическое пространство, увеличив время пребывания в эфире.

По сути, речь идет о *новом витке человеческой культуры*, точнее, о *космической цивилизации*. Ее характеризуют иные масштабы. Жизнь разворачивается за пределами Земли и даже Солнечной системы. На смену естественной природной среде обитания человека приходит космическая межпланетная среда, в которой нет места таким явлениям, как времена года, климат, земное тяготение или земные сутки. Жизнь наполняется новым содержанием, а привычные для человека физические характеристики перестают играть в ней какую-либо роль. Человеку предстоит приспособиться к проявляющему себя здесь в полном блеске закону инерции, к свободе движения, исчезновению веса и давления, к неопределенности направления – отсутствию вертикальных, горизонтальных, наклонных линий, к жизни в замкнутом объеме. Ему необходимо принять космическую бесконечность, пугающую своей безграничностью и завораживающую своей красотой, научиться жить без кислорода и противостоять убийственным ультрафиолетовым лучам. Космос не проявляет дружелюбия по отношению к человеку. Отнюдь не случайно при его описании К. Э. Циолковский использует противоречивые определения: «волшебной картине» противостоит «однообразная чернота – траур без всяких оттенков», «невообразимый мрак», «мрачный звездный фон», «черная камера», «черный шарообразный свод очень незначительного объема с непроницаемыми стенками, усаженными звездами и туманными пятнами» [1, с. 68–69].

Новый мир внесет коррективы и в повседневный быт человека, за ненужностью перестанут использоваться привычные в земной жизни и такие необходимые с утилитарной точки зрения предметы, как кровати, подушки, матрацы и одеяла. В связи с тем, что обитатель эфирного пространства сам будет определять и устанавливать желаемую температуру, отпадет потребность в одежде и обуви. «Температура, близкая к температуре человеческого тела, позволит ему обходиться без всяких одежд» [1, с. 79]. Изменение человеческих потребностей приведет к пересмотру приоритетов, культурных ценностей и повлияет на организацию социального пространства.

В качестве важнейшего фактора преобразования технической сферы выступит время. Бесконечная большая продолжительность третьего этапа становления техносферы обеспечит не только существенный прогресс науки и техники, изменятся привычные образцы техники и стереотипные подходы к ее созданию. На смену земным штампам, имевшим немаловажное значение в организации «планетоподобного образа жизни», придут иные идеи. Астроинженерная деятельность приведет к *созданию космической техники*. И если изначально всё необходимое – машины, жилища, растения – доставлялось с Земли, то в перспективе их производство станет задачей жителей эфирных поселений, которые будут вынуждены изменить привычные, но малоэффективные в космическом пространстве принципы организации земной техники. Потребуется, например, автоматы, выполняющие работу при очень низких и очень высоких температурах, термоэлектрические батареи, способные всю теплоту Солнца превращать в электричество [1, с. 83–87], или астроинженерные сооружения, обеспечивающие все необходимые для жизни условия [7].

К. Э. Циолковский убежден, что человеческий разум всегда стремился изменить естественные условия своего существования, создавая искусственную среду и совершенствуя повседневные условия бытия. Утверждение об изменении вектора развития человечества безосновательно. Логично предположить, что на этапе создания эфирных поселений «искусственность дойдет до своего крайнего предела» [1, с. 116], обеспечив максимально благоприятные условия для жизни человека. Обратное воздействие может привести к появлению человека будущего. «Новые условия создадут и новую породу существ» [1, с. 116], – отмечает ученый. Следовательно, мы вправе ожидать влияния рукотворной среды на сущностные характеристики человека. Что в этом случае произойдет с искусственной технической средой? «Окружающая искусственность будет ослаблена и, может быть, понемногу сойдет на нет» [1, с. 116]. Впервые мы сталкиваемся с предположением, что наращивание техносферы, рано или поздно, должно закончиться. Ожидается период отрицания искусственной технической среды, так как для отдаленных потомков человека межзвездная среда превратится в естественную среду обитания. Подобно эволюционирующим животным человек одержит «победу над воздухом и эфирным пространством», превратившись «сначала в воздушное существо, а потом и в эфирное» [1, с. 116]. Человек сможет жить в пустоте, космос превратится в родную стихию для интеллектуального существа. Философ называет людей будущего «прирожденными гражданами эфира, чистых солнечных лучей и бесконечных бездн космоса» [1, с. 116]. Животному космоса не потребуются сверхсовершенная техносфера. Его облик не сочетается с типичными образцами техники: вполне вероятным кажется, например, замена самолетов и ракет иными способами перемещения – левитацией или телекинезом.

В описываемой схеме развития технической сферы бесконечное совершенствование техники сменяется ее отрицанием. На протяжении длительного времени человек, демонстрировавший свою заинтересованность и потребность в технических достижениях, своим биологическим преобразованием ставит точку в истории техносферы. Уходит потребность в мире конструируемой реальности. Гражданину Вселенной не нужны искусственные артефакты, их заменяет естественная космическая среда.

Вопросы «биологии будущего» рассматриваются К. Э. Циолковским в нескольких работах: «Живые существа в космосе» (1895), «Исследование мировых пространств реактивными приборами» (1903), «Биология карликов и великанов» (1920–1921). В них затрагиваются не только проблемы распространения жизни в космическом пространстве, но и вопросы, связанные с биологической эволюцией человека, оказавшегося в безвоздушном пространстве. Интерес представляет также статья «Цели звездоплавания», написанная и изданная отдельной брошюрой в 1929 году, в которой ученый говорит о другом способе освоения человеком космической среды. Он предполагает трансформацию не самого человека, а космической среды, не становление прирожденного жителя космоса, а *изменение параметров космического пространства через его наполнение атмосферой для дыхания* [8, с. 177]. В этом случае не устанавливается предел эволюции техносферы, в связи с чем можно утверждать, что К. Э. Циолковским было предложено *два сценария развития технической сферы*.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итог вышесказанному, следует отметить, что космическая философия К. Э. Циолковского представляет собой грандиозную картину эволюции техники. Вера в то, что развитие разума, его торжество и могущество позволят не только преобразовать Землю, достигнуть совершенства, но и расселиться по Солнечной системе, заставляла просчитывать всё то, с чем человечество столкнется на пути индустриализации космического пространства.

Данной проблематикой философ увлекся в возрасте 16–18 лет [9, с. 57], посвятив ей более 20 работ, их отличает творческий подход, глубина проработки темы и энциклопедичность. Заявив, что «невозможное сегодня станет возможным завтра» [1, с. 115], ученый занялся

определением оптимальных способов и средств промышленного освоения космоса. В результате К. Э. Циолковскому удалось наметить основные этапы эволюции техносферы, описать и обосновать каждый из них. При этом речь идет не просто о развитии и совершенствовании технического мира, философ проектирует общество будущего, затрагивая целый ряд философских, гносеологических и морально-этических проблем. Обращение к мировоззренческим вопросам позволяет ему сформулировать наиболее общие принципы и цели деятельности человека в космосе. В них просматриваются смелый полет фантазии и точный научный расчет. Удивляет также обоснованность конкретных технических решений, предлагаемых ученым для реализации поставленных задач, и его оптимизм. Нет сомнения, что идеи, высказанные К. Э. Циолковским, предопределили современное развитие космонавтики, а программа индустриального освоения космоса, предложенная ученым, не потеряла своей актуальности и в настоящее время.

Список используемых источников

1. Циолковский К. Э. Промышленное освоение космоса : сб. тр. – М. : Машиностроение, 1989. – 278 с.
2. Циолковский К. Э. Общественная организация человечества. Горе и гений. – М. : МИП «Память», ИПЦ РАН, 1992. – 32 с.
3. Циолковский К. Э. О душе, о духе и о причине // Щит научной веры : сб. ст. – М. : Самообразование, 2007. – С. 41–51.
4. Циолковский К. Э. Космическая философия. Живая Вселенная. – М. : Академический Проект, 2020. – 640 с. – URL: <https://prior.studentlibrary.ru/book/ISBN9785829133795.html> (дата обращения: 01.11.2023).
5. Циолковский К. Э. Растение будущего. Животное космоса // Собрание сочинений. – М. : Изд-во Академии наук СССР, 1964. – Т. 4. – С. 286–304.
6. Циолковский К. Э. Исследование мировых пространств реактивными приборами // Научное обозрение : научно-философ. и лит. журн. – СПб., 1903. – № 5. – URL: <https://epizodsspace.narod.ru/bibl/dorev-knigi/ciolkovskiy/issl-03st.html> (дата обращения: 07.11.2023).
7. Мизун Ю. В., Мизун Ю. Г. Разумная жизнь во Вселенной. – М. : Вече, 2000. – 428 с. – URL: http://www.xliby.ru/astronomija_i_kosmos/razumnaja_zhizn_vo_vselennoi/p33.php (дата обращения: 08.11.2023).
8. Циолковский К. Э. Путь к звездам : сб. – М. : Изд-во АН СССР, 1961. – 359 с.
9. Циолковский К. Э. Черты из моей жизни (1935). – Тула : Приокское книжное изд-во, 1983. – 158 с.

Implementation of a method for embedding data into video images in the process of analog-digital conversion / E. S. Abazina, A. A. Erunov, A. M. Mahmutov, D. Y. Mishin // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 691. – P. 6–15.

The article provides a review of the use of known digital steganography methods in images, their main disadvantages and vulnerability to modern steganalysis methods. Methods for introducing additional information into images at the level of quantization noise during analog-to-digital conversion are considered, taking into account the characteristics of the human vision system. A new approach to embedding data into video images in the process of analog-to-digital conversion is presented, which makes it possible to achieve increased secrecy of embedding while ensuring the reliability of reception of both hidden and open information used for embedding. The proposed method is based on the introduction of noise-like signals into the image spectrum obtained in orthogonal bases different from those used in discrete cosine and wavelet compression algorithms. A coordinated choice of noise-like signals used to embed hidden information, with orthogonal bases to obtain the image spectrum before standard compression procedures, allows not to violate the statistical characteristics of the image by bringing the embedding artifacts of the embedded information to the characteristics of quantization noise.

Keywords: digital steganography, covert channels, analog-to-digital conversion.

Evaluation of favorable observation periods for artificial space objects using ground-based optical means / E. V. Blagodyrenko, V. I. Gorbulin, S. V. Logunov, N. V. Radionov // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 691. – P. 16–25.

The article calculates the duration of the shadow portion of the orbit of an artificial space object for the case of a cylindrical shadow of the Earth. An expression is obtained that determines the location of an artificial space object on the boundary of the Earth's shadow cylinder. An equation of the fourth degree is presented, which allows us to determine the corresponding intersection points of the “infinite” cylinder of the Earth's shadow both towards the Sun and in the opposite direction. The article shows that the cylindrical representation of the Earth's shadow in sunlight correctly describes the illumination conditions of the orbits of an artificial space object only near the Earth's surface, and in high orbits this representation can lead to erroneous conclusions and decisions. As a result, the authors found the condition for an artificial space object to be on the surface of the Earth's full shadow cone and the condition for the object to be on the boundary of the penumbral cone. The values of the angular position of the Sun were obtained, characterizing the beginning and end of the period of “shadow-free zones” in the year

Key words: latitude argument, artificial space object, true anomaly, Earth's shadow, ecliptic, eccentric anomaly.

The method of frequency distribution of a satellite repeater for the operation of earth stations with partial channels / S. O. Burlakov, M. Y. Dragunov, D. Y. Mishin, E. A. Novikov // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 691. – P. 26–31.

This article examines the unique dynamics of the distribution of the frequency resource of a satellite repeater with a special emphasis on standard retransmission to ensure reliable operation of ground stations with partial channels. An improved approach to optimizing the choice of frequency ranges of a satellite repeater is presented, which contributes to an increase in the efficiency of using its resources and ensures stability of operation in conditions of interference.

Key words: frequency resource distribution, satellite repeater, ground station with partial channels, data transfer rate, interference protection in satellite radio channel, backpack problem.

Vylkov A. S., Melikhov A. S. Generalized model of defeat of military communications equipment in conditions of the enemy's use of conventional weapons // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 691. – P. 32–41.

A substantive description of the impact of the enemy's means of destruction on military communications equipment is presented. The possible realization of the defeat model using the finite element method of numerical simulation is considered. A step-by-step procedure for calculating the characteristics of the fragmentation field is presented. The external signs of battle damage of mobile communication equipment are formed, the relationship between the impact of fragmentation elements with different characteristics and the depth of penetration of fragments into the sample of military communication equipment depending on the construction of the equipment room is considered.

Key words: fragmentation field, finite element method, mobile communication equipment, numerical modeling, conventional weapons.

The method for determining the orbit of a space object in a geographically distributed observation system / V. I. Erokhin, A. P. Kadochnikov, D. S. Kadochnikova, V. Y. Prorok, S. V. Sotnikov // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 691. – P. 42–50.

The article considers a method for determining the orbit of a space object in a geographically distributed observation system. The essence of the method is to determine the "instantaneous" values of the Kepler elements of the orbit of a space object from observations of its angular topocentric coordinates by a ground-based system of optical and passive radar facilities on a "small arc" (a time interval significantly shorter than the period of rotation of the spacecraft).

Key words: orbit determination, small time interval, non-synchronous angular measurements, geographically distributed observation system.

Levin D. V., Parshutkin A. V. Mathematical model of construction inversely synthesized radar image of target in joint processing of frequency separated radar signals // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 691. – P. 51–62.

The principle of forming a complex radar image when observing a target by ground-based space survey radar operating in mode of inverse synthesis of antenna aperture is considered. A model has been developed and procedure for processing two narrow-band radar signals separated by frequency is presented when constructing an inversely synthesized complex radar image of a target. The results of modeling estimation of radar system resolution by range and angular position of a point object by intensity of inversely synthesized radar image with join processing of two radar signals separated by frequency are presented.

Key words: inverse synthesis of antenna aperture, interperiodic accumulation of signals, radar station, radar image, point object.

The hydrometeorological modeling in solving problems of evaluating the effectiveness of hydrometeorological support / A. A. Borisov, Y. V. Kuleshov, A. B. Makov, N. S. Novikov // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 691. – P. 63–70.

The article proposes an approach to modeling the situation in hydrometeorological terms when solving problems of evaluating the effectiveness of hydrometeorological support based on the method of statistical simulation.

The relations for calculating particular quality indicators are given in relation to the operation of developing specialized hydrometeorological forecasts.

Key words: hydrometeorological support, dangerous phenomena, efficiency, quality.

Recognition of radio emissions of communication devices operating in MIMO – OFDM mode / I. D. Veselov, I. Y. Ereemeev, L. A. Ovcharenko, S. S. Semenyuk // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 691. – P. 71–83.

The article discusses the features of the formation of OFDM signals transmitted in the mode of space-time and space-frequency coding in communication and data transmission systems. An approach to the recognition of OFDM signals transmitted in spatial encoding mode is proposed, based on the identification and evaluation of pilot symbols in the structure of the OFDM signal.

Key words: radio emission source, OFDM, MIMO, spatial coding.

Choice substantiation of the projected aviation surveillance system structure and parameters based on the assessment of potential joint multi-route surveys performance / A. N. Grigor'ev, D. N. Komrakov, D. S. Korshunov, V. M. Lizan // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 691. – P. 84–93.

Based on the experience of analytical modeling of aviation surveillance systems, in the interests of evaluating the potential effectiveness of the targeted operation of an aircraft, a mathematical description has been finalized, which partially removes the assumptions and limitations accepted in existing studies. The completed formalization of the description of the aviation surveillance system allows us to take into account the variability of the number of aircraft operating in the mode of joint multi-route survey of a remote large-scale area object, and the influence of wind on their movement along a given trajectory. The proposed mathematical model is implemented using an analytical method, which, in a first approximation, makes it possible to assess the impact of shooting conditions and parameters on the performance of the surveillance system in an accessible way. A computational experiment was performed on the example of a group of conditionally real aircraft, and its results were presented and interpreted. The studies performed on the developed model revealed the existence of conditions for optimal performance of the aviation surveillance system, estimated by the amount of footage taken at a given distance of the object.

Key words: productivity of the aviation surveillance system, aircraft, optoelectronic complex, joint multiroute shooting, areal shooting object.

Biryukov D. N., Dudkin A. S., Rodionov E. S. Approach to creation of crypto-secure mesh-network // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 691. – P. 94–101.

The approach to organization of mesh-network and information transmission based on application of packet switching technology according to configurable LoRa physical layer protocol between several devices is considered. The printed circuit board of the antenna is designed and the amplitude-frequency characteristics of the broadband antenna-feeder device are analyzed. The system solving the problem of organization of decentralized secure network with application of AES-256 encryption algorithm is designed and developed. Proposals on automation of data transmission to data processing centers are put forward.

Key words: Mesh network, LoRa, encryption algorithm, information security, secure communication channel.

Biryukov D. N., Zakharov O. O., Sabirov T. R. Approach to building a knowledge system for solving problems of assessing the security of information technical systems // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 691. – P. 102–111.

The problem of joint use of open sources of data on software vulnerabilities, tactics and techniques of attackers with various software tools for auditing the information security of information technology systems is considered. An approach to the synthesis of a knowledge system

is proposed to generate scenarios for testing the security of information technology systems that take into account information security requirements at a specific facility. Proposals for the implementation and application of the designed knowledge system in software products have been generated.

Key words: information security, penetration testing, information security audit, knowledge system, knowledge model.

Bugaev I. A., Danilov V. V. A model for monitoring DNS traffic in the tasks of investigating computer incidents related to the operation of malicious software // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 691. – P. 112–120.

The article discusses the use of DNS infrastructure elements in the formation of a hidden data transmission channel from malicious software, the stages of its deployment. A model of DNS traffic monitoring is presented in order to determine the exploitation of malicious software based on indicators of suspicious activity.

Key words: computer incidents, unauthorized access, DNS network service, network traffic parameters, transmission channel, malicious software, network interactions.

Egorov E. V., Ovcharov V. A. Technology of passive identification of harmful dos traffic for information security incident investigation tasks // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 691. – P. 121–133.

A technology for identifying malicious DoS traffic has been developed and implemented in software for the purpose of investigating information security (IS) incidents in the context of denial-of-service attacks based on amplification and reflection of traffic; approaches to countering this malicious activity have been reviewed and justified.

Key words: information security, network traffic, DoS attack, information security incident, ITCS, IP, DHCP, ICMP.

Methodology for assessing thermal loads during the launch of a space rocket / A. V. Antropova, I. A. Efremkov, V. V. Kozlov, A. V. Lagun // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 691. – P. 134–143.

The article presents analytical methods for assessing thermal loads during the launch of space rockets. The main situations for calculating thermal loads are shown, which include the processes of heating the covering sheet of gas ducts, heating processes to the level of melting of the flue wall, as well as heating with ablation of the covering sheet. Methods are presented for estimating thermal loading parameters for cases of type I, II and III boundary conditions in problems of unsteady heating of the walls of a gas-dynamic path. New analytical relationships have been obtained for the estimated engineering calculation of thermal loading processes typical for the conditions of launching space rockets.

Key words: starting equipment, starting loads, thermal loads, melting, ablation, heating rate.

Batyrshin E. M., Pachin A. V., Stolyarov A. A. Intellectual repairing system for technical complexes // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 691. – P. 144–151.

Some new challenges and the constant drive for efficiency are reason for increasing of the used tools. At present using of complex technical systems is basis for successful industrial development, space exploration, medical care and safety ensuring.

At same time, problem of equipment recovery has significant relevance.

An approach to the construction of a repair system based on artificial intellect technologies is described. The use of such systems will significantly reduce recovery time, and, as a result, decrease losses, caused by equipment downtime.

Key words: complex technical systems, reliability, artificial intellect, semantic systems, ontological modeling

Belyankin A. V., Duga V. V., Poluyan M. M. Increasing the specific emissivity of radiators of thermal control systems of space microvehicles // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 691. – P. 152–160.

The article discusses the prospects for the development of space microdevices in the direction of increasing energy consumption and increasing heat flows. Calculations of the characteristics of various surfaces of radiator radiators are given, conclusions are drawn about the most effective type of their radiating surfaces.

Key words. Micro spacecraft, radiator emitter, thermal management system, thermal control system, radiant heat exchange.

Definition of the longest observation time gap for different orbital groupings of spacecraft ballistic structures for periodic remote sensing of earth's entire surface / R. A. Vinokurov, S. A. Vlasov, A. E. Egorov, I. Y. Kubasov // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 691. – P. 161–172.

In order to meet the observation time gap requirement for orbital groupings of Earth remote sensing spacecrafts, the viewing band width needs to be equal to the inter-turn shift. To satisfy this requirement, the hardware equipped spacecrafts with a viewing band width smaller than the inter-turn shift must generate joint viewing band width. The paper presents a calculation of the longest observation time gap for different ballistic structures of spacecraft orbital groupings with on-board hardware, whose viewing band width is less than the inter-turn shift.

Key words: orbital groupings, spacecraft, remote sensing, longest observation time gap, band width, inter-turn shift, frontal group.

Vyaldin D. M., Lisitsky V. V. Model for assessing the reliability of an information-measuring system in real time // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 691. – P. 173–191.

A model has been developed for assessing the reliability of an information-measuring system in real time, taking into account ongoing technical operation activities (maintenance and restoration). This model, unlike the well-known ones, is closest to the real technical state of the information-measuring system and makes it possible to increase the validity of decisions on adjusting the timing and volume of maintenance and restoration based on the results of assessing the technical condition of the information-measuring system at a given time operation.

Key words: reliability assessment model, operational readiness ratio, real-time mode, maintenance, restoration, information-measuring system.

Zabuzov V. S., Zakharov I. V., Mousallam A. An Improved Way to Optimize the Number of Control Points in Fault-Tolerant Parallel Information Processing // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 691. – P. 192–198.

Solving the problems of using onboard computer systems under the conditions of the destructive influence of unfavorable factors requires a rational organization of the computing process. A parallel computing process with time redundancy in a fault-tolerant computer under external influences is considered. It includes periodic saving of the current state of calculations with the

possibility of their recovery. The previously known solution of the optimization problem for choosing the frequency of saving the current state of the computational process under conditions of possible failures has been improved. The results of simulation modeling are presented and their brief analysis is given.

Key words: on-board computer system, degradation, parallel computing, fault-tolerant computing process.

Kalmykov E. V., Kiryukhin S. N., Saidanov V. O., Mathematical model of the working cycle of a diesel engine and its software implementation // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 691. – P. 199–210.

A mathematical model of the working cycle of a gas turbine supercharged diesel engine in the form of an open thermodynamic system and its software is presented, which allows calculations of work processes both under normal operating conditions and under specific conditions when the engine is operating as part of a power plant at military infrastructure facilities for various purposes. The simulation results can be displayed on digital displays, virtual graph builders, or oscilloscopes.

Key words: diesel engine, workflow, operating conditions, mathematical model, software implementation, numerical values of parameters.

Kalyuta A. N., Maltsev G. N., Sklemin D. V. Reliability Of Technical Diagnostics Of Complex Technical Systems Using Diagnostic Models // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 691. – P. 211–219.

Analytical dependencies for determining the reliability of technical diagnostics of complex technical systems (CTS) are presented. The formalized description of the process of technical diagnostics of CTS is performed using diagnostic models. Diagnostic models represent sets of types of technical states represented in the database on situations of CTS functioning. The sign of the technical state of the object of diagnostics is formed when the vector of its controlled parameters corresponds to the vector of technical state parameters from the database. Several approaches are considered for estimating the determination of probabilistic indicators of reliability of technical diagnostics of CTS: a posteriori probability of correct determination of the type of technical state and the resulting probability of correct diagnosis of the technical state of the object of diagnostics. The results of calculations of reliability indicators of technical diagnostics of CTS at different probabilities of errors of the first and second kind in the control of diagnostic parameters.

Key words: diagnostics, reliability, technical condition, false failure, undetectable failure, probability.

Models for the study of the efficiency of operating processes of power supply systems of rocket and space complexes / S. S. Kamchalov, V. V. Karagodin, D. V. Rybakov, I. V. Khomich // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 691. – P. 220–227.

The article discusses the task of analyzing the efficiency of the processes of functioning of power supply systems of rocket and space complexes. To solve this problem, the need to consider the power supply system and its consumers as a single purposeful system that ensures that a rocket and space complex performs its intended tasks is justified. Considering the specifics of the functioning of rocket and space complexes, a probabilistic model is proposed to evaluate the result of the functioning of power supply systems. The content and physical meaning of each of the components of this model is considered, considering possible options for the laws of their description. Based on the results obtained, models are proposed to study the efficiency of the processes of functioning of power supply systems.

Key words: rocket and space complex, power supply system, efficiency, model, efficiency of the operating process.

Karagodin V. V., Khomich I. V. Necessity justification of Space Forces objects autonomous power supply system synchronous generator excitation PID-controller tuning methods improvement // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 691. – P. 228–239.

An analysis of existing and industry-implemented PID-controller tuning methods was carried out. Based on the power supply system model in software package MATLAB Simulink, the results, obtained using different controller tuning methods were compared.

The necessity of applying the principles of adaptive control in synchronous generator excitation PID-controller tuning were justified.

Key words: synchronous generator, PID-controller, controller parameters tuning, transient processes.

Kleimenov Y. A., Khayrullin R. Z. Application of the stochastic superindicator method for identification of the distribution law type based on the results of statistical processing of small samples in the tasks of forecasting failure-free performance of complex technical systems for military purposes // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 691. – P. 240–247.

Modifications of the exponential distribution law in the forms of complex-exponential dependence and Gompertz-Makegam distribution are proposed and investigated. Application of the mathematical apparatus of the theory of characteristic functions and operator series for modeling of random variables is described. Analytical formulas for the Gompertz-Makegam distribution are given for its decomposition into an operator series. The method of stochastic superindicator is applied to determine the tendency of change of the determining parameter of a complex technical system. The method is designed to identify the type of distribution law by the results of statistical processing of small samples. The results of modeling of failure rate function of the complex technical system are presented.

Key words: small sample, stochastic superindicator method, Gompertz-Makegam distribution.

Model of the operation process of a measuring system with built-in control / Y. A. Kuvykin, A. P. Smirnov, V. V. Suprunyuk, R. Z. Khairullin // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 691. – P. 248–254.

A semi-Markov model of the operating process of a measuring system with built-in control is proposed. A special feature of the model is the introduction of additional states into the classical semi-Markov model of the process of operating a measuring instrument to await transitions to various other states. Additional states were used to simultaneously simulate the built-in control loop and the verification loop of the measuring system as a whole, the interval between verifications of which should be established in the operational documentation. The time of transition from one state of a semi-Markov model to another can occur at both random and deterministic moments of time. This change in the classical semi-Markov model of the process of operating a measuring system made it possible to simulate the processes of functioning of a measuring system with built-in control.

Key words: measuring system, built-in control, semi-Markov model.

Okorokov M. V., Sukhoruchenkov B. I. The problem of reliability control of technical systems taking into account parametric reliability // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 691. – P. 255–266.

A comparative analysis of the reliability of technical systems (TS) for sudden failures and parametric reliability is given. It is shown that these properties are fundamentally different and reflect different aspects of the reliability of the vehicle TS, therefore, when monitoring the reliability of the vehicle TS, they must be taken into account together. The methods of determining and estimating the probability of failure-free operation of the vehicle, taking into account sudden and gradual failures, are described.

Key words: Technical system, reliability, parametric reliability, probability of failure-free operation, statistical estimates of indicators.

Revyakov B. A., Ryzhiy N. V. Methodology conducting analysis ground electrical energy by objects consumption space infrastructure. // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 691. – P. 267–278.

The article is devoted to the problem of collecting, processing and analyzing initial information on electrical consumption energy by objects of ground based space infrastructure, necessary to control its rational consumption and calculate its technical losses in the power supply system. A methodology has been developed for analyzing electrical energy consumption a characteristic feature of which is determining the contribution of each input equipped with an electricity meter to the total electricity consumption of ground based space infrastructure objects. This methodology was tested using the example of electrical consumption objects of the rocket space complex «Souz-2».

Key words: power supply system, electricity consumption, electric power losses, contribution to total electricity consumption, annual energy consumption schedule, time series, least squares method, seasonal indicators method.

Bashkirtsev V. P., Kulganov V. A., Kuptsov I. M. The use of psychological aspects in the model of professional training of military engineering personnel in the interests of improving the management efficiency of complex human-machine systems // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 691. – P. 279–289.

Automation of the troop control process helps to increase the efficiency of the use of complex human-machine systems (CHMS) during their intended operation. A human operator, during the occurrence of sudden situations that require an immediate response, is qualitatively superior to automated weapons, military and special equipment (MST) in the decision-making process. Being an integral part of the military personnel management system in the process of command and control of troops, it must have certain competencies based on knowledge of engineering psychology, ergonomics, and labor psychology, the formation of which requires taking into account its psychological characteristics during the training of military engineering personnel. The purpose of the article is to identify, analyze and take into account psychological aspects in the model of professional training of military engineering personnel in the interests of increasing the efficiency of management of military personnel.

Key words: human operator, complex human-machine systems, automated command and control systems, technical control systems, engineering psychology, model of professional training of military engineering personnel.

Inozemtseva L. A., Kuzhikin N. S. Psychological and pedagogical problems of the formation of a modern culture in a military educational institution // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 691. – P. 290–294.

The publication examines the current psychological and pedagogical problems of the formation of a learning culture as a set of certain norms, values and pedagogical practices that exist in the educational environment and affect the interaction between all participants in the educational

process, it also offers directions for the formation of a learning culture at the Department of professional retraining and advanced training of teaching staff of the Academy.

Key words: learning culture, the technology of learning, pedagogical culture, professional retraining, professional development, digital educational environment.

Musienko S. A. Entrance control of the level of training as a normative and didactic determinant of improving the process of professional development of teaching staff // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 691. – P. 295–299.

The publication discusses the current problems of developing technologies for designing the educational process. Attention is focused on the entrance control of students' training in advanced training programs. The author substantiates the input control of the level of training as a normative and didactic determinant of improving the process of professional development of pedagogical workers. Special attention is paid to the use of such learning technologies that make it possible to implement the principle of a differentiated and individual approach to learning, which primarily involves studying students, identifying their characteristics, capabilities, initial level of learning and readiness to successfully master the required educational programs.

Key words: education, additional education, additional professional program, entrance control, test, determinant, competencies, learning technology, practical training, project work.

Gutorovich O. V. The problem of the technosphere and its evolution in the context of K. E. Tsiolkovsky's Space Industrialization program // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 691. – P. 300–308.

The researcher's interest is connected with the problem of space exploration and its industrialization, proposed in the works of the cosmonautics theorist and practitioner K. E. Tsiolkovsky. The article presents the evolution of the technical sphere, the analysis of each of its stages. The characteristic includes a description of the successive successes of man in the course of implementing the idea of the development of the Earth, the Solar System, other star systems, as well as the features of the artificial-natural reality created by man. Attention is paid to the conditions of scientific and technical transformations, their possible consequences, as well as the relationship between the development of the technosphere and society.

Key words: K. E. Tsiolkovsky, Universe, space industrialization, technosphere, technobiocenoses, technicism, progress, atom-spirit, ethereal settlements.

Абазина Евгения Сергеевна, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

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

Батыршин Евгений Маркович, 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); тел.: 8 (812) 347-95-96.

Белянкин Александр Васильевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Бирюков Денис Николаевич, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Благодыренко Евгений Васильевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-33.

Борисов Алексей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-52.

Бугаев Иван Андреевич, кандидат военных наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8(812)325-14-15.

Бурлаков Сергей Олегович, доктор технических наук, профессор; Военная академия связи имени Маршала Советского союза С. М. Буденного (194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр-т, 3).

Веселов Илья Дмитриевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Винокуров Роман Александрович, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 235-27-18, e-mail: vka@mil.ru

Власов Сергей Александрович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-16, e-mail: vka@mil.ru

Вылков Александр Сергеевич, Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного (194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр-т, 3); тел.: 8 (922) 703-10-08, e-mail: asvyлков@mail.ru

Вяльдин Дмитрий Михайлович, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8(812)347-99-81, e-mail: vka@mil.ru

Горбулин Владимир Иванович, доктор технических наук; профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-89.

Григорьев Андрей Николаевич, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел. 8(812)347-95-51.

Гуторович Ольга Викторовна, кандидат философских наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Данилов Виталий Валерьевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8(812)325-14-15.

Драгунов Михаил Юрьевич, Военная академия связи имени Маршала Советского союза С. М. Буденного (194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр-т, 3).

Дуга Вадим Вадимович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Дудкин Андрей Сергеевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Егоров Андрей Евгеньевич, 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

Егоров Елизар Валерьевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-59.

Еремеев Игорь Юрьевич, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Ерохин Владимир Иванович, доктор физико-математических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Ерунов Анатолий Александрович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Ефременков Илья Александрович, 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

Забузов Вячеслав Сергеевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Захаров Иван Вячеславович, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Захаров Олег Олегович, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-87, vka@mil.ru

Иноземцева Людмила Александровна, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Кадочников Андрей Павлович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Кадочникова Дарья Сергеевна, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Калмыков Евгений Витальевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Калюта Андрей Николаевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-32, e-mail: vka@mil.ru

Камчалов Сергей Сергеевич, 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

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

Кирюхин Сергей Николаевич, кандидат технических наук, доцент; пенсионер МО РФ.

Клейменов Юрий Анатольевич, доктор технических наук, старший научный сотрудник; Главный научный метрологический центр (ГНМЦ) Министерства обороны Российской Федерации (141006, Россия, г. Мытищи Московской обл., ул. Комарова 13), тел.: 8-916-171-67-67, e-mail: ura19572006@yandex.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

Комраков Дмитрий Николаевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел. 8(812)347-95-51, e-mail: 070_503@mail.ru

Коршунов Денис Сергеевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел. 8(812)347-95-51.

Кубасов Игорь Юрьевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-16, e-mail: vka@mil.ru

Кувыкин Юрий Александрович, кандидат технических наук; Главный научный метрологический центр Министерства обороны Российской Федерации (141006, Россия, г. Мытищи Московской обл., ул. Комарова, 13); тел.: 8 (977) 268-75-98, e-mail: original.rus@mail.ru

Кужекин Николай Сергеевич, кандидат философских наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Кулганов Владимир Александрович, доктор медицинских наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-93.

Кулешов Юрий Владимирович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-52, e-mail: vokat1@rambler.ru

Купцов Игорь Михайлович, кандидат военных наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-01, e-mail: vka@mil.ru

Лагун Андрей Валерьевич, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-14, e-mail: vka@mil.ru

Левин Дмитрий Викторович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-35, e-mail: vka@mil.ru

Лизан Вячеслав Миронович, Военный институт (научно-исследовательский) Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского (197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-51.

Лисицкий Владимир Вадимович, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8(812)347-99-81, e-mail: vka@mil.ru

Логунов Сергей Владимирович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-33.

Маков Александр Борисович, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-52.

Мальцев Георгий Николаевич, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-32, e-mail: vka@mil.ru

Махмутов Адильбек Муратович, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 218-51-19, e-mail: vka@mail.ru

Мелихов Антон Сергеевич, Пермский военный институт войск национальной гвардии Российской Федерации (614112, Россия, Пермь, ул. Гремячий Лог, 1); тел.: 8 (938) 200-55-45, e-mail: melichov1983@mail.ru

Мишин Дмитрий Юрьевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mail.ru

Мусаллам Али, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mail.ru

Мусиенко Сергей Анатольевич, кандидат военных наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mail.ru

Новиков Евгений Александрович, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mail.ru

Новиков Николай Сергеевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-52.

Овчаренко Леонид Александрович, доктор технических наук; «Центр системного анализа и моделирования» – филиал АО «Научно-технический центр радиоэлектронной борьбы» (192029, Россия, Санкт-Петербург, пр. Большой Смоленский, 2, лит. А); тел.: 8(495) 609-61-77.

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.

Окороков Максим Владимирович, доктор технических наук; Военная академия РВСН имени Петра Великого (143900, Россия, Московская обл., г. Балашиха, ул. Карбышева, 8); тел. 8 (999) 873-02-20, e-mail: okorokovm00@mail.ru

Паршуткин Андрей Викторович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-35, e-mail: vka@mail.ru

Пачин Андрей Владимирович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mail.ru

Полуян Максим Михайлович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mail.ru

Пророк Валерий Ярославович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mail.ru

Радионо́в Никола́й Васи́льевич, доктор экономических наук; профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-89.

Ревяко́в Бори́с Алекса́ндрович, 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

Родионо́в Егору́ Серге́евич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: email@vka.loc

Рыбако́в Дми́трий Вячесла́вович, 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.

Рыжи́й Никола́й Вита́льевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Саби́ров Тиму́р Римо́вич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-87, vka@mil.ru

Сайдано́в Викто́р Оле́гович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); vka@mil.ru

Семеню́к Серге́й Серге́евич, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (981) 750-07-88.

Склеми́н Дми́трий Влади́мирович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-32.

Смирно́в Андре́й Павло́вич, доктор технических наук; Главный научный метрологический центр Министерства обороны Российской Федерации (141006, Россия, Московская область, г. Мытищи, ул. Комарова, 13); тел.: 8 (903) 502-49-25, e-mail: smanpa@mail.ru

Сотнико́в Серге́й Влади́мирович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Столя́ров Алекса́ндр Алекса́ндрович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Супруню́к Васи́лий Влади́мирович, доктор технических наук; Главный научный метрологический центр Министерства обороны Российской Федерации (141006, Россия, Московская область, г. Мытищи, ул. Комарова, 13); тел.: 8 (916) 040-79-04, e-mail: 3260vvs@mail.ru

Сухо́рученко́в Бори́с Ива́нович, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Российской инженерной академии; Военная академия РВСН имени Петра Великого (143900, Россия, Московская обл., г. Балашиха, ул. Карбышева, 8); тел.: 8 (909) 979-25-14.

Хайруллин Рустам Зиннатуллович, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник; Главный научный метрологический центр Министерства обороны Российской Федерации (141006, Россия, Московская область, г. Мытищи, ул. Комарова, 13); тел.: 8 (926) 405-22-17, e-mail: zrkzrk@list.ru

Хомич Иван Владимирович, 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

Аверкиев Николай Фёдорович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Алёшкин Андрей Петрович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Арсеньев Владимир Николаевич, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Басотин Евгений Викторович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Басыров Александр Геннадьевич, доктор технических наук, профессор; 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).

Волков Валерий Фёдорович, доктор военных наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Гончаренко Владимир Анатольевич, кандидат технических наук, доцент; 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).

Козинов Игорь Александрович, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Косырев Сергей Викторович, доктор военных наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Кужекин Николай Сергеевич, кандидат философских наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Лебедев Евгений Леонидович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Лохвицкий Владимир Александрович, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Мальцев Георгий Николаевич, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Миронов Андрей Николаевич, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Новиков Владимир Александрович, доктор военных наук, профессор, действительный член Академии военных наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Новиков Евгений Александрович, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Панкратов Алексей Владимирович, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Пилькевич Сергей Владимирович, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Садин Дмитрий Викторович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Салов Вячеслав Викторович, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Семенов Кирилл Владимирович, доктор технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Тарасов Анатолий Геннадьевич, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Харченко Александр Викторович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Шмелев Валентин Валерьевич, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Якимов Виктор Леонидович, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).