

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

Выпуск 678

2021 г.

Издатель:

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

Редакционный совет

Председатель:

Начальник Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского
доктор технических наук, профессор М.М. Пеньков

Члены редакционного совета:

С.В. Буг – заместитель начальника Михайловской военной артиллерийской академии
по учебной и научной работе *доктор пед. наук, проф.*;

В.П. Гаенко – главный научный сотрудник НИЦ БТС 12 ЦНИИ МО РФ
доктор техн. наук, проф., заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации;

А.М. Гончаров – начальник Главного управления научно-исследовательской деятельности и технологического
сопровождения передовых технологий (инновационных исследований) МО РФ *доктор воен. наук, проф.*;

М.А. Еремеев – профессор кафедры института комплексной безопасности и специального приборостроения
ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» *доктор техн. наук, проф.*;

А.В. Кузичкин – заместитель генерального директора АО «Научно-исследовательский институт телевидения»
по информационным технологиям *доктор техн. наук, проф.*;

Б.В. Соколов – главный научный сотрудник Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации
Российской академии наук *доктор техн. наук, проф., заслуженный деятель науки Российской Федерации;*

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

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

Главный редактор:

доктор техн. наук, проф. Ю.В. Кулешов

Редколлегия:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Выпускающий 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. 09.08.2021.
Формат печатного листа 445×300/4.
Уч.-печ. л. 103,00. Уч.-изд. л. 51,00
Тираж 26 экз. Заказ 3918/90.
Отпечатано в типографии
Военно-космической академии
имени А.Ф. Можайского

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

- Абазина Е.С., Семенов С.С., Федоров В.Г., Федорова С.В.* Концептуальная модель процесса взаимодействия оператора и программно-аппаратного комплекса..... 8
- Казахов Б.Д., Марченко М.В., Петухов А.М.* Особенности управления организационно-технической системой военного назначения при воздействии дестабилизирующих факторов..... 17

СВЯЗЬ, УПРАВЛЕНИЕ, НАВИГАЦИЯ И ВОЕННАЯ РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

- Аверкиев Н.Ф., Салов В.В., Хасанов А.Ю.* Особенности формирования орбитальной группировки космических аппаратов с нестабильной баллистической структурой для определения местоположения источников радиоизлучения... 23
- Богачев С.А., Власов С.А., Кубасов И.Ю.* Периодичность обзора космическим аппаратом заданной параллели с восходящей или нисходящей части орбиты..... 32
- Бродский М.С., Звонарев В.В., Попов А.С.* Метод построения вероятностного пространства на множестве совместных событий для расчета вероятностей битовых ошибок приема радиосигналов с QPSK модуляцией при наличии помех..... 43
- Сахно И.В.* Поиск и обнаружение фазоманипулированных сигналов при переходе к обработке в нелинейном временном масштабе с использованием свойств фрактальных отображений..... 51

СБОР И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

- Алексеев В.Ф., Колесников Д.Д., Медяников Д.О.* Методика геодезического обеспечения элементов взлетно-посадочной полосы аэродрома государственной авиации..... 61
- Григорьев А.Н., Дудин Е.А., Комраков Д.Н.* Модель многомаршрутной оптико-электронной съемки площадного объекта из космоса 68

<i>Девяткин А.М., Панков А.В.</i> Комплексирование методов информационно-аналитической работы для повышения качества информационных решений....	78
<i>Дудин Е.А., Зайцев В.В., Рожков В.В.</i> Процедура построения нормалей к границе площадного объекта по бинарному растровому изображению.....	88
<i>Еремеев И.Ю., Маковский В.Н., Смирнов А.Н.</i> Метод идентификации частично наблюдаемой телекоммуникационной инфраструктуры на основе энтропийного анализа динамической топологии.....	95
<i>Кузьмичев В.А., Пилькевич С.В.</i> Подход к агрегированию объектов сетевого мониторинга на основе гранулярных онтологий.....	106

ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

<i>Бирюков Д.Н., Воробьев А.М., Ястребов А.В.</i> Опыт подготовки и проведения соревнований по компьютерной безопасности.....	113
<i>Бурлака И.М., Пилькевич С.В.</i> Исследование стойкости криптографических хэш-функций в приложении к задачам информационной безопасности.....	132
<i>Зима В.М., Крюков Р.О.</i> Интеграция разнотипных автоматизированных систем и средств защиты информации для контроля доступа к совместным ресурсам единой гетерогенной сети.....	137
<i>Компаниец Р.И., Ломако А.Г., Харжевская А.В.</i> Метод контроля целостности вычислений расчетных задач автоматизированных систем военного назначения на основе верификации инвариантов подобия.....	147
<i>Подшибякин А.С., Ушаков И.А., Шинкаренко А.Ф.</i> Результаты анализа функционирования механизмов защиты в беспроводных сетях передачи данных.....	163

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

<i>Арсеньев В.Н., Петухов А.Б., Ядренкин А.А.</i> Оценивание характеристик стойкости сложных систем с комплексированием полученных данных этапов испытаний, эксплуатации и применения.....	175
<i>Басотин Е.В., Поляков А.П., Шестопалова О.Л.</i> Обоснование модернизации стартового комплекса с учетом недопустимости снижения эффективности функционирования.....	181

<i>Башилов А.И., Огороков М.В., Сухорученков Б.И.</i> Метод оценивания безотказности технических систем однократного применения по результатам испытаний с учетом дефектов.....	190
<i>Буяков С.Н., Дзитоев А.М., Дзитоев М.С, Молостов А.В.</i> Применение термотрансформаторов в системах термостатирования ракетно-космических комплексов.....	203
<i>Ведерников М.В., Ильинский А.В., Сырцов Л.А.</i> Физическое моделирование течения струй по криволинейной поверхности радиопрозрачного купола.....	207
<i>Головчинский В.О., Мироненков О.В.</i> Вопросы оптимизации состава приборной базы мобильных лабораторий неразрушающего контроля стартовых комплексов.....	214
<i>Голяков А.Д., Ричняк А.М.</i> Исследование точности и надежности системы автономной навигации космического аппарата при отказе астрономического датчика.....	223
<i>Зоткин М.Ю., Миронов В.И.</i> Алгоритм стабилизации малого космического аппарата при решении задач наблюдения за орбитальным объектом.....	233
<i>Ивашков С.С.</i> Имитационная модель динамики полета истребителя-бомбардировщика для оценки эффективности работы ограничителя предельных режимов.....	240
<i>Казахов Б.Д., Козлов В.В., Лагун А.В.</i> Методика оценивания уровня влияния внешнего деструктивного фактора на безопасность эксплуатации сложного группового объекта.....	250
<i>Какаев В.В., Куликов С.В., Федоренко Д.С., Чеботарь И.В.</i> Методика классификации спектров отражения материалов и покрытий объекта ракетно-космической техники.....	263
<i>Копкин Е.В., Мышко В.В.</i> Алгоритм выбора диагностических признаков с помощью системы ортогональных векторов.....	272
<i>Краснощеков С.Н., Половников В.И.</i> Расчет параметров космической системы из больших и малых космических аппаратов на низких круговых орбитах...	284
<i>Краснощеков С.Н., Половников В.И.</i> Способ кластерного выведения малых космических аппаратов с использованием перспективной платформы разведения.....	292
<i>Крыжановский В.И., Слатов С.В., Трофимов И.А.</i> Оптимальное по быстродействию управление в двухконтурной следящей системе наведения оптико-электронного прибора.....	299

<i>Луцашко М.Н., Степанов И.В., Тимофеев В.В.</i> Методика определения периодичности использования запасных элементов вычислительной системы военного назначения.....	310
<i>Онуфриев В.В., Паршиков А.А., Сазонов С.Ю.</i> Расчет вольт-амперной характеристики термоэмиссионного преобразователя с учетом парциального давления примеси в межэлектродном зазоре.....	316
<i>Половников В.И., Фадин И.А.</i> Алгоритм определения положений космического объекта по изображению, содержащему его трек.....	323
<i>Силантьев С.Б.</i> Выведение космических аппаратов на геостационарную орбиту на основе применения универсальных роботизированных космических платформ.....	332

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

<i>Богук Ю.М., Зувев А.С., Пьянусов А.В.</i> Военно-специальные игры, как средство формирования профессиональных компетенций военного специалиста.....	341
<i>Гнидко К.О., Макаров С.А., Нагорный Д.С.</i> Поддержка принятия решения о введении особых режимов в вузах Министерства обороны Российской Федерации.....	346
<i>Данилюк А.С., Медведев В.М.</i> Основные направления формирования компетенций научно-исследовательской деятельности специалистов в области сбора и обработки информации техническими средствами.....	355
<i>Кабалин В.Л., Прищепина В.Н., Северенко А.В.</i> Повышение полевой выучки курсантов с использованием учебного комплекса «Учебное тактическое поле».....	367
<i>Сквазников М.А., Чебурков М.А.</i> Оценивание профессиональной пригодности обучающихся по специальности «Электронные и оптико-электронные приборы и системы специального назначения».....	375

ОПЕРАТИВНОЕ ИСКУССТВО И ТАКТИКА

<i>Данелян А.П., Кацик В.О., Кокшаров С.Н.</i> Методика оценивания уровня готовности офицеров подразделений воинской части к выполнению задач в составе группы боевого управления.....	382
--	-----

Рефераты статей	389
Сведения об авторах	400
Сведения о рецензентах	409

Е.С. Абазина*,
кандидат технических наук;
С.С. Семенов**,
доктор технических наук, профессор;
В.Г. Федоров**;
С.В. Федорова**

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

**Военная академия связи имени С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОПЕРАТОРА И ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА

Определена структура процесса взаимодействия элементов в сложной человеко-машинной системе «оператор – программно-аппаратный комплекс». Представлена структурная зависимость деятельности оператора от структуры и параметров элементов графического пользовательского интерфейса, с помощью которого оператор осуществляет управление программно-аппаратным комплексом для достижения цели функционирования человеко-машинной системы. На основании предложенных структуры процесса взаимодействия и зависимости деятельности оператора от параметров графического пользовательского интерфейса предложена оценка функциональной надежности человеко-машинной системы комплексным показателем – вероятностью безошибочного и своевременного выполнения предписанного способа функционирования.

Ключевые слова: функциональная надежность, графический пользовательский интерфейс, надежность деятельности оператора, человеко-машинная система.

ВВЕДЕНИЕ

Неуклонное развитие современных технологий и выполнение мероприятий по комплексному оснащению Вооруженных Сил Российской Федерации современным цифровым телекоммуникационным оборудованием сопровождаются повышением степени автоматизации рабочего места человека – оператора в сложной системе «человек – машина» (СЧМ). В деятельности человека оператора происходит увеличение объемов информационных потоков, повышается сложность решаемых оперативных задач. Все это, в совокупности с недостаточной адаптацией технических средств к особенностям человека, способствует повышению напряженности в деятельности специалиста, что приводит к нарастанию числа ошибок действий оператора и снижению надежности человеко-машинной системы в целом [1–3].

СУЩНОСТЬ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОПЕРАТОРА И ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА

Человеко-машинная система «оператор – программно-аппаратный комплекс (ПАК)» ориентирована на достижение конкретной цели в результате своего функционирования.

Под процессом функционирования СЧМ понимается совокупность действий оператора и операций ПАК [4, 5]. В этой связи процесс взаимодействия оператора и ПАК является основной составляющей процесса функционирования всей системы «оператор – ПАК». Такой процесс заключается в осуществлении управляющих воздействий оператора на объект управления (ПАК) с необходимым качеством, а также в постоянном обмене между оператором и программным обеспечением ПАК информацией (сигналами, параметрами и сведениями) о состоянии и функционировании объекта управления. Таким образом, человеческая деятельность является основной и целеполагающей в процессе функционирования СЧМ, а работа технической части носит исполняющий характер. В настоящей работе рассматривается функциональная надежность СЧМ и ее зависимость от надежности деятельности операторо-

ра. Показатели надежности ПАК, определяемые на стадии проектирования и разработки образца техники, в данной работе не учитываются и принимаются за постоянные величины.

Взаимодействие между оператором и ПАК осуществляется посредством пользовательского интерфейса в диалоговом режиме. Пользовательский интерфейс включает в себя аппаратную и программную составляющие. К аппаратному пользовательскому интерфейсу относятся средства управления и отображения информации, используемые человеком – оператором при осуществлении диалога с вычислительными средствами. Программный пользовательский интерфейс, называемый графическим пользовательским интерфейсом (ГПИ), представляет собой совокупность программных средств, обеспечивающих взаимодействие оператора с вычислительными средствами и визуализацию виртуальных объектов на экране дисплея.

В интересах определения взаимосвязи выходных показателей СЧМ «оператор – ПАК», определяющих ее функциональную надежность, с эргономическими показателями ГПИ, с физиологическим и психическим состоянием оператора, а также с внешними воздействиями (естественными и искусственными) окружающей среды необходимо разработать модель с последующим проведением имитационного моделирования [6].

В работе в качестве методологической основы принят человеко-системный подход, а обобщенный структурный метод выбран методом моделирования [7], что обосновано главной и целеполагающей ролью человека в процессе взаимодействия оператора и ПАК посредством ГПИ. Такой подход позволит провести единую формализацию для всех компонентов СЧМ и учесть не только последовательность выполняемых операций, но и специфические особенности поведения человека, а также характер отношений между отдельными элементами процесса.

СТРУКТУРА ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОПЕРАТОРА И ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА

Модель процесса взаимодействия оператора и ПАК посредством ГПИ – S в общем виде можно представить кортежем следующего вида:

$$S = \langle E_s, F_s, R_s, Q_s \rangle, \quad (1)$$

где E_s – структура процесса;

F_s – множество типовых функциональных единиц, выполняемых элементами структуры;

R_s – множество взаимосвязей между элементами структуры;

Q_s – множество показателей элементов структуры, определяющих эффективность и надежность функционирования системы «оператор – ПАК» в целом.

Под структурой процесса E_s понимается множество элементов и внешней среды, участвующих в процессе взаимодействия, которое включает: множество инженеров-операторов E_1 ; множество инструментов: программных E_2 и технических (аппаратных) E_3 , средства пользовательского интерфейса средств автоматизации и вычислительной техники, исходную информацию E_4 ; множество реальных объектов и процессов внешней среды, оказывающих влияние на показатели деятельности оператора и ПАК E_5 , при этом

$$E_s = \langle E_1, E_2, E_3, E_4, E_5 \rangle. \quad (2)$$

Структурное описание оператора E_1 представляет собой совокупность его инженерно-психологических характеристик, которые количественно и качественно определяют процессы приема, переработки и передачи информации, принятия решения в ходе управления ПАК.

К ним относятся профессиональные характеристики инженера-оператора F_p , характеристики каналов приема информации оператором, называемые в работе анализаторами F_a , интеллектуальные характеристики инженера-оператора F_i . Указанные характеристики носят стохастический характер, тесно взаимосвязаны между собой и зависят от множества внутренних и внешних по отношению к человеку факторов.

Процесс взаимодействия оператора и ПАК рассматривается как процесс влияния графического пользовательского интерфейса ПАК на деятельность оператора, так как через зрительный анализатор человек получает около 90% всей информации [3, 8].

Таким образом, структурное описание оператора представляет собой кортеж вида

$$E_1 = \langle F_p, F_a, F_i \rangle. \quad (3)$$

Структурное описание графического пользовательского интерфейса является совокупностью описаний множества элементов, из которых состоит интерфейс, и взаимосвязей между ними. Поскольку в графическом пользовательском интерфейсе WIMP-типа (как получившем наибольшее применение в ПАК) любой элемент может содержать в себе другие элементы, т. е. элемент может быть как бы контейнером для других элементов, то имеет место отношение подчиненности между элементами, формирующее их древовидную структуру [8]. Начальная экранная форма интерфейса является при этом главным контейнером, внутри которого размещены все его элементы.

Таким образом, структура интерфейса имеет вид

$$E_2 = \langle E_2^n \rangle, \quad (4)$$

где E_2^n – элемент интерфейса, индекс которого определяет его положение в структуре и взаимосвязь между элементами.

При этом структура самого элемента имеет следующий вид:

$$E_2^n = \langle P^n, S^{nm}, a^n \rangle, \quad (5)$$

где P^n – множество параметров элемента с индексом n ;

S^{nm} – множество элементов, входящих в его состав;

a^n – линейный порядок во множестве S^{nm} , определяющий последовательность элементов в E_2^n .

Поскольку в графических пользовательских интерфейсах WIMP-типа пользователь может интерактивно взаимодействовать только с одним элементом интерфейса, линейный порядок a^n определяет цепочку перемещения между элементами (рис. 1).

У каждого элемента можно выделить следующие основные параметры:

– информационные параметры элемента I , представляющие собой множество надписей T , множество изображений P , уровни информационной загруженности I_{in} и I_{out} ,

$$I = \langle T, P, I_{in}, I_{out} \rangle; \quad (6)$$

визуальные параметры элемента D (параметры оформления): используемый шрифт fnt , кегель k , начертание s , цвет текста (переднего плана) fnt и фона b , используемые изменения m текста (например, подчеркивание), используемые эффекты e (например, мерцание текста),

$$D = \langle fnt, k, s, fnt, b, m, e \rangle; \quad (7)$$

геометрическое расположение элемента на экранной форме интерфейса, заданная его контуром L , – замкнутая ломаная линия, являющаяся упорядоченной последовательностью точек с координатами x и y ,

$$L = \langle (x_1, y_1), \dots, (x_i, y_i) \rangle, i = 1, 2, 3, \dots \quad (8)$$

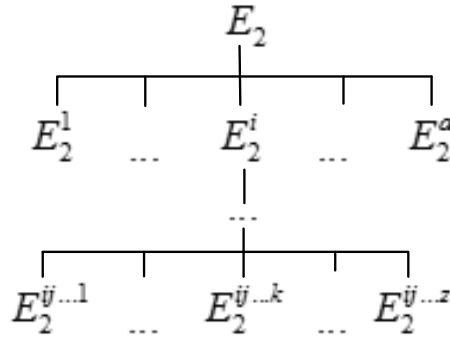


Рис 1. Структура множества элементов, входящих в состав ГПИ WIMP-типа

Таким образом, параметры элемента интерфейса можно формально описать следующим набором:

$$P^n = \langle I, D, L \rangle = \left\langle \begin{array}{l} I = \langle T, P, I_{in}, I_{out} \rangle \\ D = \langle fnt, k, s, frt, b, m, e \rangle \\ L = \langle (x_1, y_1), \dots, (x_i, y_i) \rangle \end{array} \right\rangle. \quad (9)$$

Тогда формальное описание элемента интерфейса будет иметь вид

$$E_2^n = \langle P^n, S^{nm}, a^n \rangle = \left\langle \begin{array}{l} I = \langle T, P, I_{in}, I_{out} \rangle \\ D = \langle fnt, k, s, frt, b, m, e \rangle \\ L = \langle (x_1, y_1), \dots, (x_i, y_i) \rangle \\ S^{nm} = \langle P^{nm}, S^{nmw}, a^{nm} \rangle \\ a^n \end{array} \right\rangle = \dots \quad (10)$$

Множество E_3 технических (аппаратных) средств пользовательского интерфейса средств автоматизации и вычислительной техники представляет собой совокупность средств управления, предназначенных для ввода информации и осуществления управляющих воздействий на ПАК от оператора, и средств отображения информации, предназначенных для представления оператору информации в доступной для его восприятия форме.

С учетом большого многообразия технических средств пользовательского интерфейса введем ограничения: в структуру рассматриваемой модели процесса взаимодействия оператора и ПАК посредством ГПИ входят устройство вывода (отображения) информации – монитор или экран $E_{3\alpha}$, устройства управления и ввода информации – клавиатура $E_{3\kappa}$ и мышь $E_{3\mu}$.

$$E_3 = \langle E_{3э}, E_{3к}, E_{3м} \rangle. \quad (11)$$

Множество E_4 исходной информации, необходимой для осуществления трудовой деятельности оператора, представляет собой совокупность исходных данных (таблиц, команд и др.) E_{4d} , а также инструкций (алгоритмов действия оператора) E_{4i} :

$$E_4 = \langle E_{4d}, E_{4i} \rangle. \quad (12)$$

Множество реальных объектов и процессов внешней среды, оказывающих влияние на показатели деятельности оператора и ПАК E_5 , представляет собой совокупность субъективных E_{5p} и объективных факторов E_{5o} , оказывающих воздействие на систему «оператор – ПАК» (климатические условия, воздействие противника, психологическое состояние оператора, режим труда и отдыха):

$$E_5 = \langle E_{5o}, E_{5p} \rangle. \quad (13)$$

МЕТОД ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ. ТИПОВЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ЕДИНИЦЫ И СТРУКТУРЫ

Процесс взаимодействия оператора и ПАК посредством ГПИ представляется множеством типовых функциональных единиц (ТФЕ). Следует отметить, что ГПИ состоит из множества элементарных действий оператора F_{s1} (например, нажатие клавиши на клавиатуре, поиск необходимого элемента ГПИ) и технологических операций ПАК F_{s2} , обеспечивающих процесс взаимодействия оператора и ПАК, (например, отклик системы на действие оператора, выполнение техникой команды). При этом множества F_{s1} и F_{s2} принадлежат множеству машинных операций и действий оператора – F_{s0} , обеспечивающих функционирование СЧМ «оператор – ПАК»:

$$F_s = \langle F_{s1}, F_{s2} \rangle, \forall F_{s1}, F_{s2} \in F_{s0}. \quad (14)$$

Состав ТФЕ зависит от имеющихся средств управления и ввода информации E_3 , а также от элементов, входящих в структуру ГПИ.

Взаимодействие оператора с элементом ГПИ описывается набором ТФЕ, который представляет собой типовую функциональную структуру (ТФС). Например, взаимодействие оператора с элементом «меню» в соответствии с обобщенным структурным методом описывается следующим набором основных и дополнительных действий. К основным действиям, формализованным в модели, относятся: выбор (поиск) необходимого элемента из представленных на экране, перемещение руки на мышь, указание курсором мыши на элемент, отклик ОП ПАК на действие оператора, нажатие кнопки мыши, отклик ОП ПАК на действие оператора, выполнение команды оператора техникой, ответ ОП ПАК на полученную команду (действие), анализ полученного результата и принятие решения на дальнейшие действия.

Множество дополнительных действий, представляющих собой логические операции, включает контроль (самоконтроль) правильности выполнения предыдущих операций. Различают также вспомогательные действия, к которым относятся служебные, обозначающие начало и конец операции, соединители и ограничители, также требующие учета в модели.

Каждая типовая функциональная единица описывается основными показателями качества выполнения ТФЕ – вероятностью безошибочного выполнения и временем выполнения, которые могут быть определены на основе статистических данных или путем расчета. Таким способом описывается взаимодействие оператора с каждым типовым элементом используемого в структуре ГПИ ПАК, образуя при этом библиотеку ТФС со своими показателями ка-

чества выполнения ТФС, рассчитанными в соответствии с показателями качества ТФЕ, входящими в рассматриваемую ТФС и со структурой самой ТФС (рис. 2).

Пользуясь созданной библиотекой ТФС взаимодействия оператора с элементом ГПИ составляется модель процесса взаимодействия СЧМ «оператор – ПАК» с применением ГПИ (в виде функциональной сети) по выполнению функции или задачи (функций или задач), возложенных на СЧМ.



Рис. 2. ТФС последовательных ТФЕ процесса взаимодействия оператора с элементом ГПИ «меню» с контролем функционирования

Порядок ТФЕ в типовых функциональных структурах, порядок ТФС в структуре выполняемой задачи (функции) СЧМ определили множество взаимосвязей между ТФЕ структуры

процесса взаимодействия оператора и ПАК посредством ГПИ R_s . Данное множество представляет собой упорядоченный кортеж:

$$R_s = \langle R_{s1}, R_{s2}, R_{s3} \rangle. \quad (15)$$

В данной формуле введены следующие обозначения:

R_{s1} – множество задач (функций, целей), решаемых СЧМ «оператор – ПАК»;

R_{s2} – множество возможных операций (ТФС), выполняемых оператором и ПАК в ходе решения задачи;

R_{s3} – множество возможных переходов между действиями (операциями) в ходе решения задачи, которые имеют вероятностный характер.

ПОКАЗАТЕЛИ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ НАДЕЖНОСТИ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И СЧМ «ОПЕРАТОР – ПАК»

Разработанная концептуальная модель процесса взаимодействия оператора и ПАК посредством ГПИ отражает цель, структуру, метод описания, показатели функциональной надежности (рис. 3).

В соответствии с выводами работ [9, 10] для оценивания функциональной надежности рассматриваемой СЧМ целесообразно применить комплексный показатель, представляющий собой вероятность безошибочного и своевременного выполнения предписанного способа функционирования СЧМ – $H(x)$ в течение заданного промежутка времени $x \in [t_1, t_2]$.

Этот показатель определяется формулой

$$Q(t_1, t_2) = P\{H(x) \in H_0, \forall x \in [t_1, t_2]\}, \quad (16)$$

где H_0 – состояние безотказного, безошибочного и своевременного функционирования СЧМ.

С учетом использования обобщенного структурного метода и структуры процесса взаимодействия оператора и ПАК посредством ГПИ можно определить множество показателей, определяющих функциональную надежность СЧМ «оператор – ПАК». Данное множество включает подмножества типовых функциональных единиц, взаимосвязей между элементами структуры – показателей ТФС и показателей выполнения отдельных задач (функций), возложенных на СЧМ:

$$Q_s = \langle Q_F, Q_{R2}, Q_{R1} \rangle. \quad (17)$$

Подмножество Q_F состоит из возможных значений вероятностей безошибочного выполнения элементарных действий и времени выполнения этих действий оператором Q_{Fon} и ПАК (ПО ПАК) $Q_{FПАКС}$. При оценивании показателей надежности СЧМ «оператор – ПАК», т. е. при оценивании безошибочности работы и своевременности ее выполнения во взаимосвязи с параметрами структуры ГПИ, показатели ТФЕ (время и вероятность безошибочного выполнения ПО ПАК) приняты постоянными величинами.

Множество Q_{R2} представлено показателями ТФС, к которым относятся возможные значения вероятностей безошибочного взаимодействия оператора с элементом ГПИ, а также продолжительность этого взаимодействия.

Во множество Q_{R1} вошли значения вероятностей безошибочного выполнения задач (отдельных функций) и параметры, характеризующие продолжительность выполнения задач.

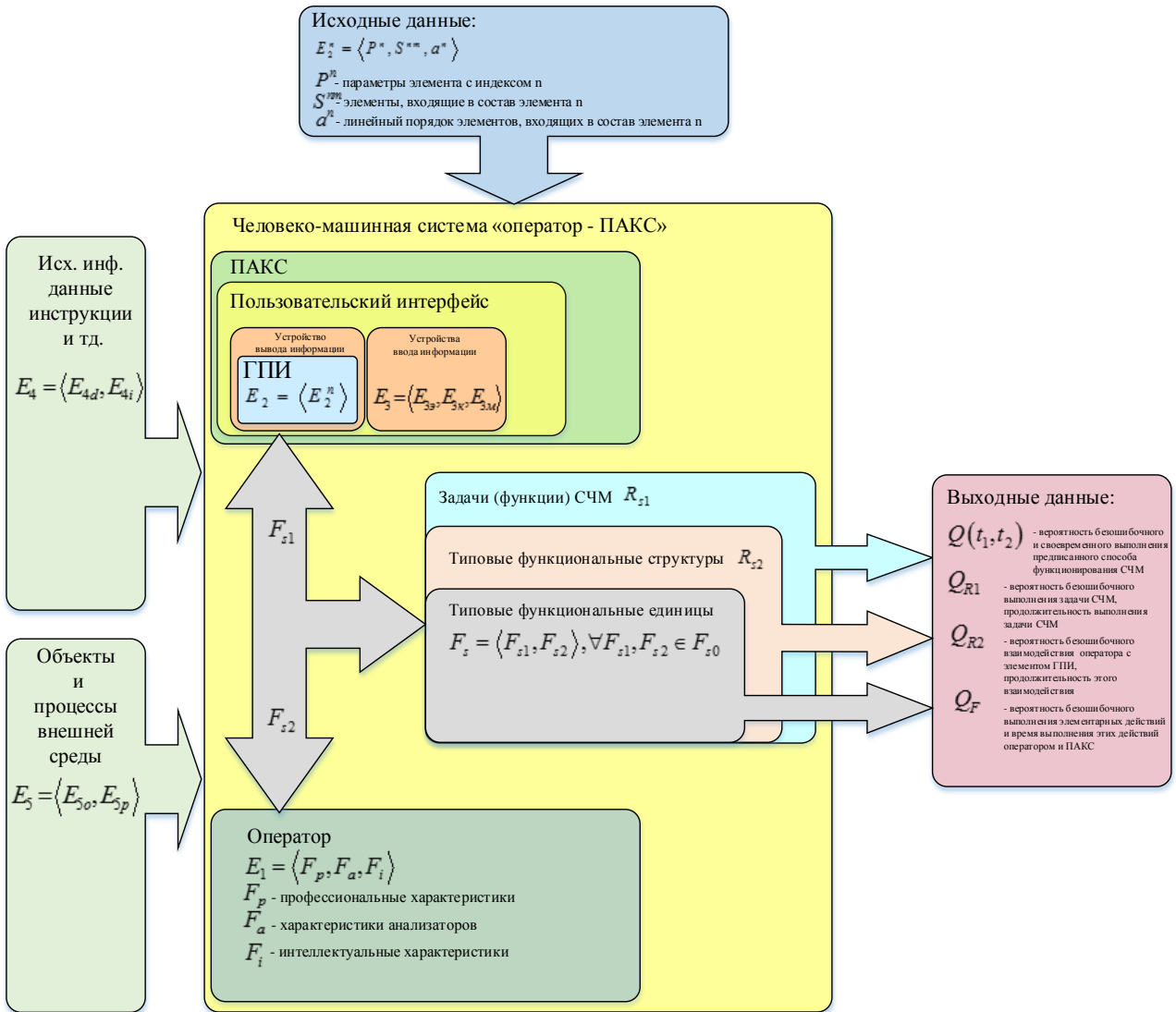


Рис. 3. Концептуальная модель взаимодействия оператора и ПАК посредством ГПИ

Совокупность множеств Q_F, Q_{R2}, Q_{R1} представляет собой поэтапную оценку качества функционирования СЧМ, позволяющую проводить поуровневое вычисление показателей функционирования СЧМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Надежность системы «оператор – ПАК» – это совокупная характеристика техники и обслуживающих ее людей, включающая как структурную, так и функциональную надежность элементов системы. Функциональная надежность деятельности оператора зависит от эргономических показателей техники, к которым относятся как эргономические показатели организации рабочего места, так и эргономические показатели формы и вида предъявления потока рабочей информации, а для оператора программно-аппаратного комплекса – это графический пользовательский интерфейс.

В связи с развитием современных технологий и повышением степени автоматизации рабочих мест оператора, оценка влияния структуры графического пользовательского интерфейса становится особенно актуальной. Основанная на полученной концептуальной модели

процесса взаимодействия оператора и ПАК посредством ГПИ математическая модель позволит получить количественные, достоверные и объективные сведения о влиянии структуры графического пользовательского интерфейса на функциональную надежность деятельности оператора ПАК.

Список используемых источников

1. Информационно-управляющие человеко-машинные системы: исследование проектирование, испытания: справочник / А.Н. Адаменко [и др.]; под общ. ред. А.И. Губинского, В.Г. Евграфова. – М.: Машиностроение, 1993. – 528 с.
2. Федоров В.Г., Стародубцев Ю.И., Бегаев А.Н. Методика оценки управляемости фрагмента сети связи общего пользования с учетом влияния множественности центров управления и деструктивных программных воздействий // Вопросы кибербезопасности. – 2017. – № 4 (22). – С. 32–39.
3. Назаренко Н.А., Падерно П.И. Влияние интерфейса на состояние и здоровье оператора // Биотехносфера. – 2009. – № 6. – С. 45–52.
4. Губинский А.И. Надежность и качество функционирования эргатических систем – Л.: Наука, 1982. – 270 с.
5. Федоров В.Г., Федорова С.В., Спицын О.Л. Способ выделения структурно-топологических неоднородностей заданного фрагмента сети связи // I-METHODS. – 2019. – № 2, т. 11. – С. 1–13.
6. Семёнов С.С., Фёдорова С.В. Постановка задачи на моделирование процесса взаимодействия оператора и программно-аппаратного комплекса связи военного назначения // Материалы XVI Санкт-Петербургской международной конференции «Региональная информатика «РИ-2018». – СПб.: СПОИСУ, 2018. – С. 102–104
7. Губинский А.И., Кобзев В.В. Оценка надежности деятельности человека – оператора в системах управления. – М.: Машиностроение, 1974. – 52 с.
8. Семёнов С.С., Фёдоров В.Г., Фёдорова С.В. Классификация пользовательских интерфейсов программно-аппаратных комплексов связи и автоматизированных систем управления военного назначения // Сборник трудов III Межвузовской научно-практической конференции «Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях». – СПб.: ВАС, 2018. – Т. 1. – С. 360–366.
9. Семёнов С.С., Фёдорова С.В., Мешков С.А. Решение задачи оценки надежности функционирования системы «человек – машина» с использованием показателя эффективности взаимодействия оператора и программно-аппаратного комплекса связи военного назначения // Материалы межведомственной научно-теоретической конференции «Актуальные вопросы развития технического обеспечения в современных условиях». – СПб.: ВА МТО, 2018. – Ч. 8. – С. 162–169.
10. Концепция создания межведомственного цифрового образовательного кластера подготовки специалистов по разработке и эксплуатации инфокоммуникационных средств космического назначения / Е.А. Новиков [и др.] // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 666. – С. 285–295

Б.Д. Казахов,
доктор военных наук, профессор;
М.В. Марченко;
А.М. Петухов,
кандидат технических наук

ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ

В статье описывается методический подход к формированию технологии управления организационно-технической системой военного назначения, интегрирующей варианты управления в условиях воздействия дестабилизирующих факторов.

Ключевые слова: органы управления, организационно-технические системы военного назначения, технология управления.

ВВЕДЕНИЕ

Опыт современных войн и военных конфликтов свидетельствует о том, что на всех этапах противоборства в целях дестабилизации обстановки, создания атмосферы хаоса могут применяться реализуемые с опорой на военную силу разрушающие меры невоенного характера, эффект от которых во многих случаях превосходит военные меры. В результате осуществляется воздействие на объекты политической, экономической и социальной систем, а также на информационные и материальные (ресурсные) объекты [1–3]. Возникающие при этом факторы обстановки способны оказывать дестабилизирующее влияние на процессы в организационно-технических системах военного назначения (ОТС ВН), поэтому управление ОТС ВН должно осуществляться с их учетом. Поскольку динамика событий, вызванных негативными факторами обстановки, определяется взрывным характером заранее спланированных противоборствующей стороной действий, успешное выполнение задач ОТС ВН будет находиться в прямой зависимости от способности органов управления оперативно реагировать на складывающуюся ситуацию.

Учитывая тот факт, что ОТС ВН имеют сложную структуру и множество связей взаимодействия с внешними системами, для построения процесса управления, исключающего (сводящего к минимуму) влияние факторов обстановки на деятельность ОТС ВН, потребуется проведение большого количества информационно-аналитических операций, процедур согласования различных вопросов между органами управления и значительные затраты времени. А заблаговременная разработка планирующих документов, исключающих в полном объеме (сводящих к минимуму) влияние всех возможных негативных факторов, учитывая их пространственно-временную неопределенность, невозможна. В данных обстоятельствах формируется противоречие между крайне ограниченными в условиях высокой динамики развития дестабилизирующих факторов сроками на адаптацию процесса управления ОТС ВН к складывающейся обстановке и необходимыми для этого затратами времени.

Разрешение указанного противоречия, по мнению авторов, возможно при организации управления ОТС ВН в соответствии с технологией, которая позволяет осуществить для периодов воздействия дестабилизирующих факторов автоматизированный выбор вариантов управления объектами, сформированных в результате моделирования процессов в ОТС ВН. Предпосылками к успешной реализации такого подхода являются современные достижения в области информационных технологий и развития средств вычислительной техники.

В процессе анализа теоретических работ и изучения практики организации управления ОТС ВН было выявлено, что подобные методологии в настоящее время развиты недостаточно. В целях дальнейшего развития теории управления предлагается методика формирования технологии управления организационно-технической системой военного назначения, которая интегрирует в себе варианты управления в зависимости от воздействия дестабилизирующих факторов обстановки.

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В статье на основе анализа содержания уставных документов и положений теории управления авторами вводится понятие «технология управления организационно-технической системой военного назначения», под которым понимается установленная совокупность операций по реализации функций управления (операций управления), осуществляемая в целях выполнения организационно-технической системой военного назначения поставленных перед ней задач и распределенная по времени между органами управления ОТС ВН и их должностными лицами. Необходимо отметить, что определяется такая совокупность операций с учетом стиля работы руководителя и требований нормативных, уставных, директивных документов.

Методика формирования технологии управления организационно-технической системой военного назначения разработана на базе экспертно-аналитического метода проектирования организационных структур [4]. Структура методики представлена на рис. 1.

Разработка технологии управления начинается с анализа процесса управления задачами организационно-технической системы военного назначения, на основе которого определяются: операции управления в привязке к действиям (элементарным задачам) управляемых объектов; порядок выполнения операций управления задачами и сроки; операции управления движением необходимых ресурсов и организации взаимодействия с довольствующими органами.

По результатам анализа составляются: перечень операций управления; перечень органов управления; перечень объектов управления; перечень действий (элементарных задач объектов управления); перечень взаимодействующих систем и их действий (операций управления); перечни влияющих на выполнение действий и операций управления условий и факторов; структурно-логические схемы управления задачами ОТС ВН.

При составлении структурно-логических схем управления задачами ОТС ВН учитывается стиль работы руководителя. На структурно-логических схемах управления задачами ОТС ВН (рис. 2,а) для всех действий определяются операции управления, исходные условия, исполнители, продолжительность, потребное количество ресурсов и порядок обеспечения ими, результаты, порядок взаимодействия, критичные для выполнения задачи факторы и варианты минимизации их влияния. При определении операций управления устанавливаются конкретные действия для органов управления. Например: разработка предложений в приказ, доведение решения, создание графика, контроль выполнения мероприятия и т. д.

На основе структурно-логических схем разрабатываются графики управления задачами ОТС ВН (рис. 2,б). Каждому действию на графике соответствует определенный порядок его выполнения, основанный на требованиях нормативной базы. Для действий, срыв выполнения которых возможен под влиянием дестабилизирующих факторов, разрабатывается несколько вариантов графиков управления задачами.

На представленном фрагменте структурно-логической схемы управления задачами ОТС ВН (рис. 2,а) описывается последовательность из трех действий, которая выполняется в рамках задачи № 12. При этом действия выполняются в следующей последовательности:

12.20→12.22→12.25. Каждому действию ставится в соответствие допустимый интервал выполнения, определенный порядком выполнения задачи, а также нормативная длительность. Относительное положение внутри интервала реализации при составлении структурно-логической схемы определяется условно. Точное положение определяется по результатам моделирования.

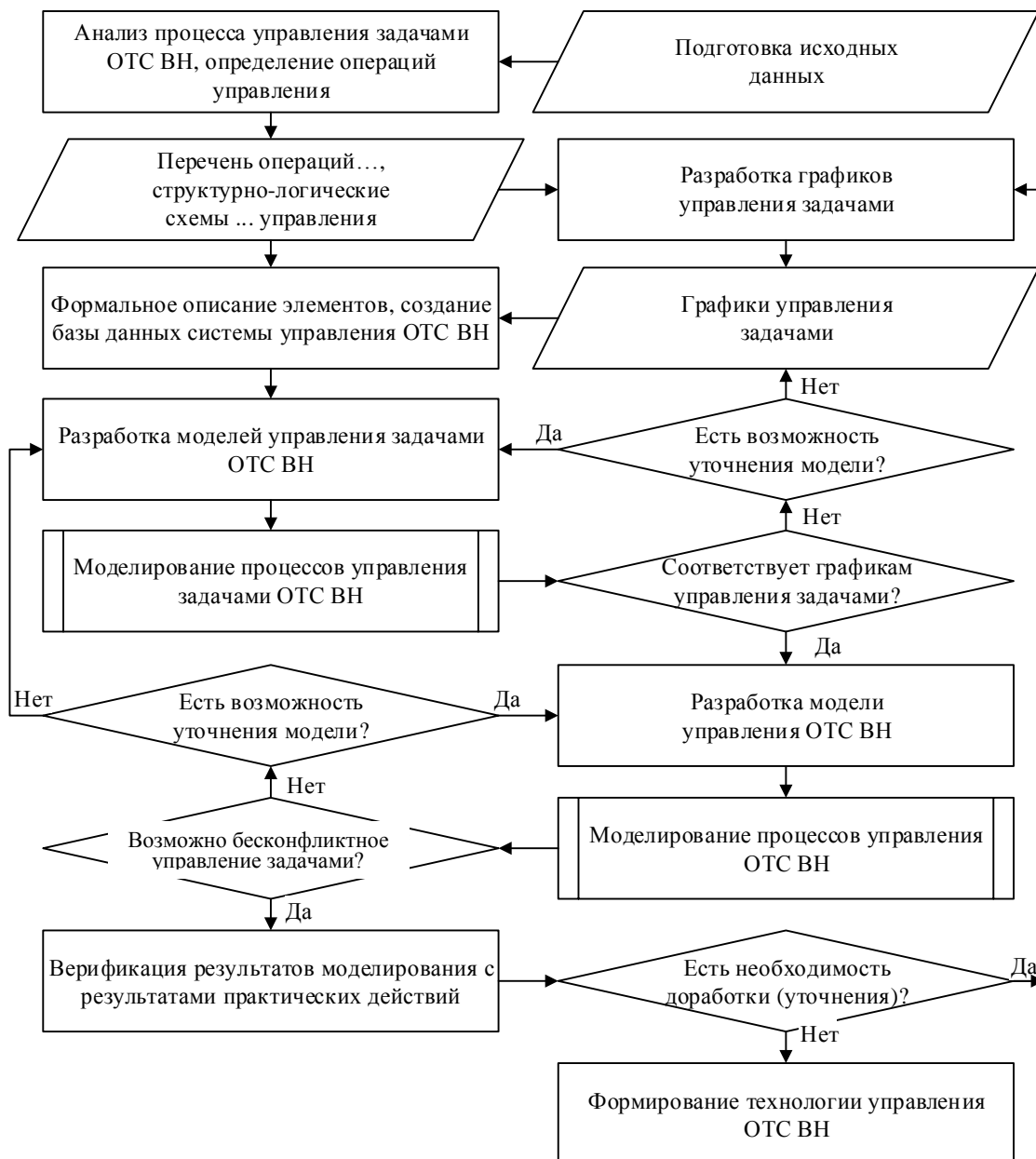


Рис 1. Методика формирования технологии управления организационно-технической системой военного назначения

На фрагменте варианта графика управления задачей ОТС ВН (рис. 2,б) представлена выборка из пяти видов операций, осуществляемых органами управления (с условными номерами У_01.02, У_02.09, У_10.03) на интервале выполнения действия 12.20 с требуемой периодичностью.

После завершения формирования графиков управления задачами разрабатываются модели управления задачами ОТС ВН. Для этого все действия, операции, перечни формализуются и представляются в виде соответствующих матриц – формируется база данных элементов системы управления ОТС ВН.

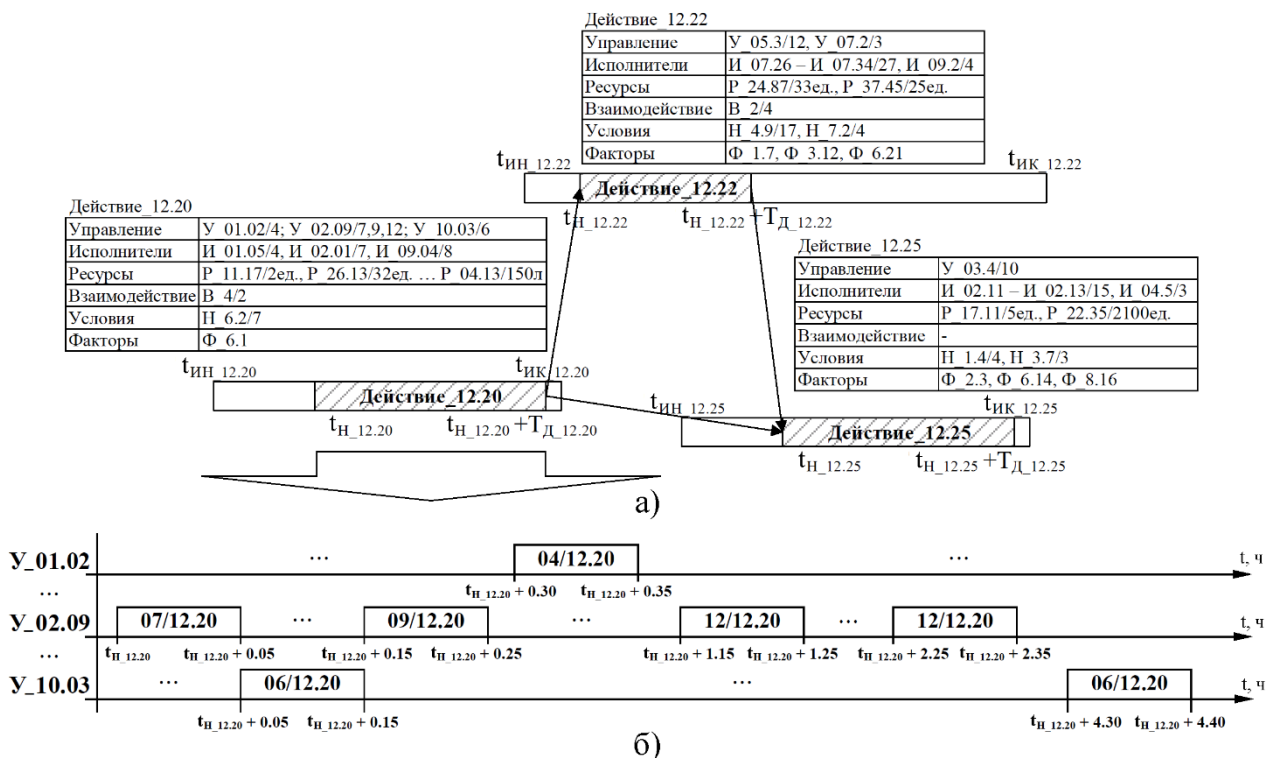


Рис. 2. Фрагменты структурно-логической схемы управления задачей ОТС ВН (а) и варианта графика управления задачей (для одного действия) (б)

На рис. 2 введены следующие обозначения:

действие_XX.YY – элемент (действие) с порядковым номером YY задачи ОТС ВН № XX;

$t_{ин_XX.YY}$ и $t_{ик_XX.YY}$ – времена начала и окончания, соответственно, допустимого интервала выполнения действия XX.YY;

$t_{Н_XX.YY}$ – время начала действия XX.YY;

$T_{Д_XX.YY}$ – нормативная (расчетная) длительность действия XX.YY;

И_АА.ВВ/С – формализованная запись действий, выполняемых исполнителем: исполнитель из подразделения (воинской части) № АА с порядковым номером ВВ по списку выполняет вид действий № С (например, начальник команды вооруженного сопровождения);

Р_ГГ.УУ/2 ед. – формализованная запись вида ресурса: ресурс вида №ГГ с порядковым номером УУ в количестве двух единиц (например, пистолет Макарова – 2 ед.);

У_ФФ.РР/Ж – формализованная запись действий, выполняемых должностным лицом органа управления: должностное лицо из органа управления № ФФ с порядковым номером РР по списку выполняет операцию управления № Ж (например, контроль готовности команды вооруженного сопровождения, уточнение задачи);

В_В/Н – формализованная запись взаимодействующего объекта: объект № В по вопросу № Н (например, допуск на объект);

Н_С.Л/1 – формализованная запись обязательного условия начала действия: условие вида № С с порядковым номером № Л в количестве 1 (например, документальное подтверждение готовности к приему команды вооруженного сопровождения);

Ф_К.В – формализованная запись фактора вида № К с порядковым номером № В, способного оказать негативное влияние на выполнение действия (например, функционирование паромной переправы на маршруте движения: функционирует или заблокирована в связи с массовыми беспорядками).

Взаимосвязи в базе данных элементов системы управления ОТС ВН описываются матрицей операций управления. С применением инструментария теории графов осуществляется

моделирование, определяются возможности управления резервами ресурсов и времени при выполнении каждой задачи в соответствии с установленным порядком.

Используя модели управления задачами ОТС ВН с уточненными в результате моделирования параметрами в качестве основы, разрабатывается модель управления ОТС ВН. Проводится моделирование процессов управления ОТС ВН, определяются возможности управления резервами ресурсов и времени в ОТС ВН. При необходимости производится корректировка моделей.

После завершения моделирования процессов управления ОТС ВН и корректировки моделей для наиболее сложных моделей управления задачами ОТС ВН проводится в ходе мероприятий боевой (оперативной) подготовки верификация результатов моделирования с результатами практических действий по управлению задачами ОТС ВН. Затем составляется перечень расхождений результатов моделирования и практических мероприятий.

Перечень расхождений результатов моделирования и практических действий по управлению задачами ОТС ВН анализируется, далее осуществляется (при необходимости) доработка моделей.

После успешного завершения моделирования процессов управления ОТС ВН и подтверждения результатов на практике на базе матрицы операций управления формируется технология управления ОТС ВН, фрагмент варианта которой в графической интерпретации представлен на рис. 3.

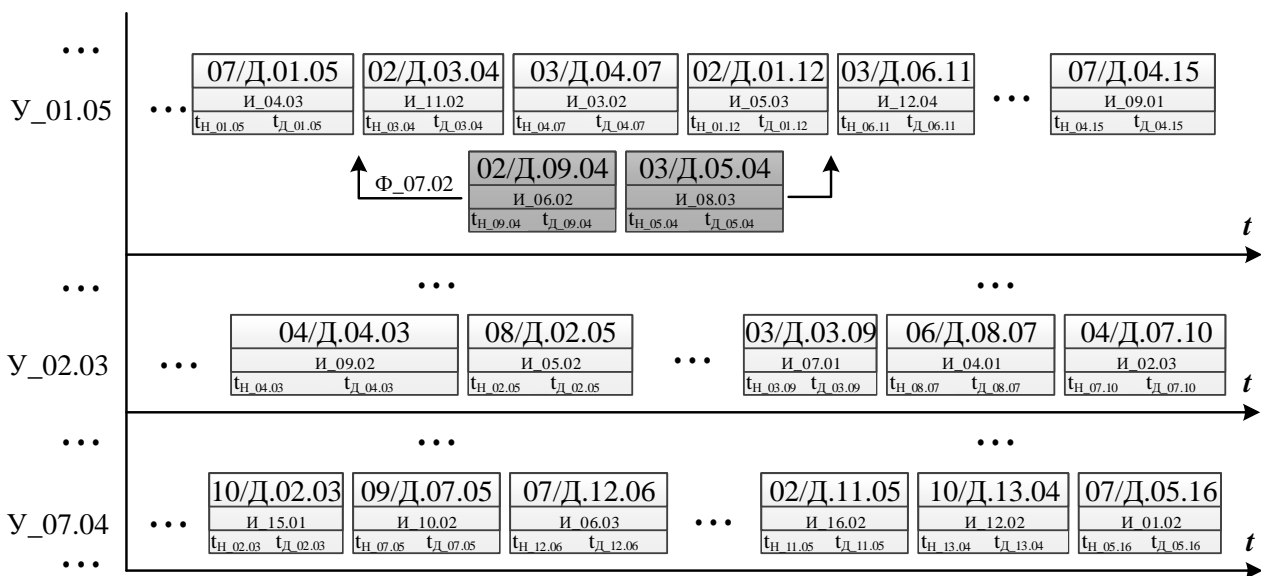


Рис. 3. Фрагмент варианта технологии управления ОТС ВН, где $Y_{FF.RR}$ – формализованное обозначение должностного лица RR органа управления FF ; $AA/Д.XX.YY$ – формализованное обозначение AA -й операции управления действием YY , задачи XX ; $И_{DD.CC}$ – формализованное обозначение ответственного за выполнение действия (исполнитель CC из подразделения DD); $Ф_{ЕЕ.НН}$ – формализованное обозначение дестабилизирующего фактора $ЕЕ.НН$; $t_{Н\ XX.YY}$ – формализованное обозначение времени начала операции управления действием YY , задачи XX ; $t_{Д\ XX.YY}$ – формализованное обозначение длительности операции управления действием YY , задачи XX

В соответствии с ранее введенным определением, технология управления ОТС ВН представляется совокупностью операций управления, показанных на графике в виде трехуровневых элементов. В верхней части элемента размещается обозначение операции управления отдельным действием конкретной задачи, в средней части – обозначение ответственного за выполнение действия в объекте управления, через которого должностным лицом органа

управления реализуется функция управления. На нижнем уровне указываются время начала операции управления и ее длительность. Размещенные на временной оси в горизонтальных рядах элементы являются последовательностью операций управления, предписанных к выполнению должностным лицам, которые соответствуют указанным слева от каждого ряда обозначениям.

В верхнем ряду представленного фрагмента технологии управления ОТС ВН должностному лицу с условным номером У_01.05 при возникновении дестабилизирующего фактора Ф_07.02 предписаны к выполнению операции управления 02/Д.09.04 и 03/Д.05.04, отличающиеся от запланированных для нормальных условий.

Сформированная технология управления ОТС ВН представляется для рассмотрения руководителю ОТС ВН, а после ее утверждения является основанием для разработки документов по организации работы органов управления (графиков, планов управления, инструкций должностным лицам и др.).

В связи с неизбежными изменениями использованных при создании технологии управления ОТС ВН исходных данных (изменение поставщиков ресурсов, транспортной сети, структуры ОТС ВН, нормативной и правовой базы организации и обеспечения деятельности ОТС ВН и др.) проводится периодическое уточнение технологии управления ОТС ВН. Верификация уточненной технологии управления ОТС ВН осуществляется на мероприятиях боевой (оперативной) подготовки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Технология управления ОТС ВН, сформированная в соответствии с предложенной методикой, при необходимости позволит в кратчайшие сроки адаптировать систему управления ОТС ВН к функционированию в условиях негативного воздействия дестабилизирующих факторов.

Наиболее сложным в реализации методики, несомненно, являются первоначальное описание всех процессов, учет всех условий и факторов, влияющих на выполнение задач. Но эти сложности придется преодолеть и при любом другом подходе к организации функционирования ОТС ВН.

Достоинством данного методического подхода являются максимальная формализация процессов, создание инструментария моделирования процессов в ОТС ВН, учет условий выполнения задач и факторов обстановки при определении совокупности операций управления подчиненными объектами.

Список используемых источников

1. Герасимов В.В. Векторы развития военной стратегии // Красная Звезда. – 2019. – № 24 (27355). – С. 4–5.
2. Joint Operating Environment 2035: The Joint Force in a Contested and Disordered World. – URL: <https://info.publicintelligence.net/JCS-JOE-2035.pdf> (дата обращения: 20.11.2020).
3. Гареев М.А., Дербин Е.А., Турко Н.И. Дискурс: методология и практика совершенствования стратегического руководства обороной страны с учетом характера будущих войн и вооруженных конфликтов // Вестник АВН. – 2019. – № 1 (66). – С. 4–13.
4. Игнатьева А.В., Максимцов М.М. Исследование систем управления. – М.: ЮНИТИ-ДАНА: Закон и право, 2012. – 167 с.

Н.Ф. Аверкиев,
доктор технических наук, профессор;
В.В. Салов,
доктор технических наук, доцент;
А.Ю. Хасанов

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ С НЕСТАБИЛЬНОЙ БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ

Введено понятие орбитальной группировки (ОГ) космических аппаратов (КА) с нестабильной баллистической структурой, и даны ее основные характеристики. Представлена схема формирования ОГ КА с нестабильной баллистической структурой, образующей кластеры КА для определения местоположения источников радиоизлучения (ИРИ) на поверхности Земли.

Ключевые слова: космический аппарат, орбитальная группировка, нестабильная баллистическая структура, определение местоположения источника радиоизлучения.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время использование кластеров КА получило широкое распространение для решения различного рода задач. При этом под кластером КА в широком смысле следует понимать совокупность из нескольких КА, расположенных определенным образом и перемещающихся в космическом пространстве. Для решения специфических задач, а именно определения местоположения ИРИ, необходимо в космическом пространстве располагать КА с учетом требований к взаимному расстоянию между ними. В этом случае можно дать более узкое определение кластера КА, под которым понимается совокупность из нескольких КА, совершающих орбитальный полет на заданном удалении друг от друга и выполняющих единую задачу по определению местоположения ИРИ [1]. Под ИРИ в данной работе будем подразумевать радиопередающие буи, которыми оснащены морские и воздушные суда, терпящие бедствие, а также группы людей, попавших в чрезвычайную ситуацию в безлюдных районах и др.

Для функционирования существующих кластеров КА необходимо удерживать взаимное расстояние между КА в заданных пределах, что предполагает регулярные коррекции их орбит [2]. Однако для этого необходимо наличие двигательных установок с топливом, систем ориентации и стабилизации, что влечет за собой увеличение массы КА и рост его стоимости.

В работе рассматривается иной принцип построения ОГ КА. Он заключается в выведении на опорную орбиту Земли специальной капсулы с малыми КА, которые поочередно отстреливаются в соответствии с программой в определенных направлениях. Такой способ позволяет сформировать орбиты КА, близкие к опорной орбите, периоды обращения у которых будут незначительно отличаться [3]. Под опорной орбитой будем понимать орбиту, по которой движется капсула с группой КА. Плоскости орбит КА, отделившихся от капсулы, можно в данном случае с высокой степенью точности считать принадлежащими плоскости орбиты капсулы (плоскости опорной орбиты).

При таком принципе построения ОГ космические аппараты будут с течением времени сближаться на требуемые расстояния, тем самым образуя кластеры КА, которые будут носить временный характер (кластер КА для текущего интервала времени), а значит, в жестком удержании относительного расстояния между КА нет необходимости. Такие временные кла-

стеры КА обладают теми же возможностями на данном интервале времени, что и известные. Следовательно, с их помощью можно определять местоположение ИРИ на поверхности Земли, например, разностно-дальномерным методом. По измеренным дальностям до трех КА определится линия пересечения двух поверхностей положения, представляющих собой гиперболоиды вращения. На пересечении этой линии с земной поверхностью будет определено место, в котором находится ИРИ.

Использование данного принципа образования кластеров КА позволяет снизить требования к бортовым комплексам управления КА и их стоимость.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ С НЕСТАБИЛЬНОЙ БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ

Кластер КА имеет свою баллистическую структуру, которая характеризуется количеством КА и их расположением в космическом пространстве. Временный кластер (для случая определения координат ИРИ на поверхности Земли) может содержать три КА, движущихся по орбитам, близким к опорной орбите, и расположенных на требуемом удалении друг от друга в текущий момент времени.

Кроме того, создаваемая ОГ КА также будет характеризоваться баллистической структурой, основными элементами которой являются [4]:

- количество плоскостей опорных орбит $N_{пл}$;
- взаимное расположение опорных орбит $\Delta\Omega_{j-1, j}$ ($j=2, \dots, N_{пл}$) вдоль экватора;
- геометрические характеристики опорных орбит a_j, e_j ;
- наклонение опорных орбит i_j ;
- количество КА в каждой плоскости опорной орбиты $N_{КА}$;
- взаимное расположение КА в каждой плоскости опорной орбиты, характеризующееся углом Δu .

ОГ КА, в которой один или несколько элементов баллистической структуры не удерживаются в заданных значениях, будем называть ОГ КА с нестабильной баллистической структурой.

В качестве примера представлена схема расположения плоскостей опорных полярных орбит (рис. 1). Восходящие узлы j -й опорной орбиты обозначены B_1, B_2, \dots, B_j , а нисходящие узлы j -й опорной орбиты – H_1, H_2, \dots, H_j . Взаимное расположение между соседними опорными орбитами определяется углом $\Delta\Omega$.

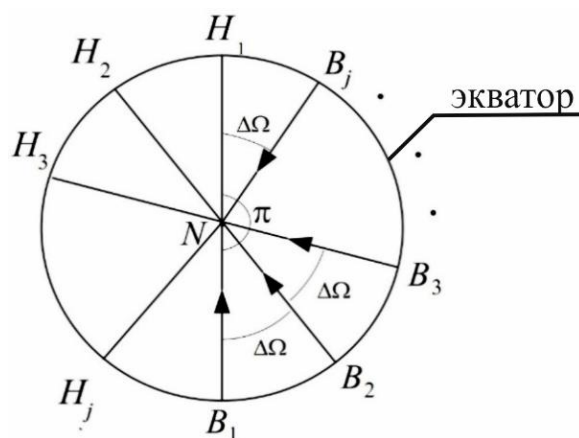


Рис. 1. Схема равномерного расположения опорных плоскостей ОГ КА вдоль экватора

Взаимное расположение КА в плоскости опорной орбиты определяется с помощью угла Δu_{kl} (k, l – номера КА, $k = 1, \dots, N_{КА}$, $l = 1, \dots, N_{КА}$, $k \neq l$). Угол Δu_{kl} образуется между линиями, соединяющими центр Земли и соответствующие КА (далее – радиусы-векторы КА).

В ОГ с жестко заданной баллистической структурой КА расположены с заданным угловым расстоянием между КА Δu_{kl} , которое удерживается с течением времени. В качестве примера на рис. 2 представлена схема расположения восьми КА в ОГ, построенной по принципу «цепочек» [4].

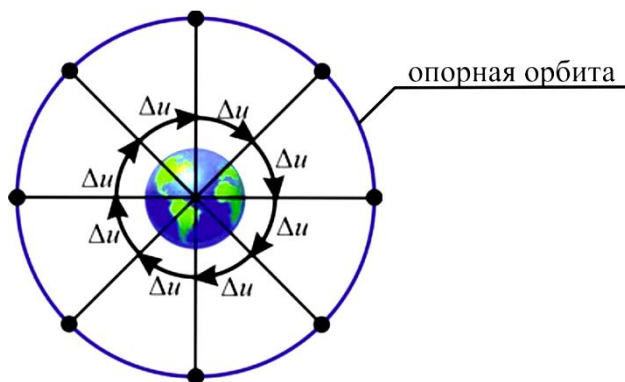


Рис. 2. Схема расположения восьми КА в ОГ, построенной по типу «цепочек»

Далее в качестве ОГ КА с нестабильной баллистической структурой будем рассматривать ОГ, в которой угловые расстояния между радиусами-векторами КА Δu_{kl} не удерживаются. В этом случае можно говорить о том, что связи по данному элементу баллистической структуры не зафиксированы. Чем больше будет отличие больших полуосей орбит отделившихся КА, тем больше будут отличаться периоды их обращения вокруг Земли. На рис. 3 показан график изменения углового расстояния Δu между радиусами-векторами двух КА во времени в случае № 1 – для ОГ КА с жестко заданной баллистической структурой; в случае № 2 – для ОГ КА с нестабильной баллистической структурой.

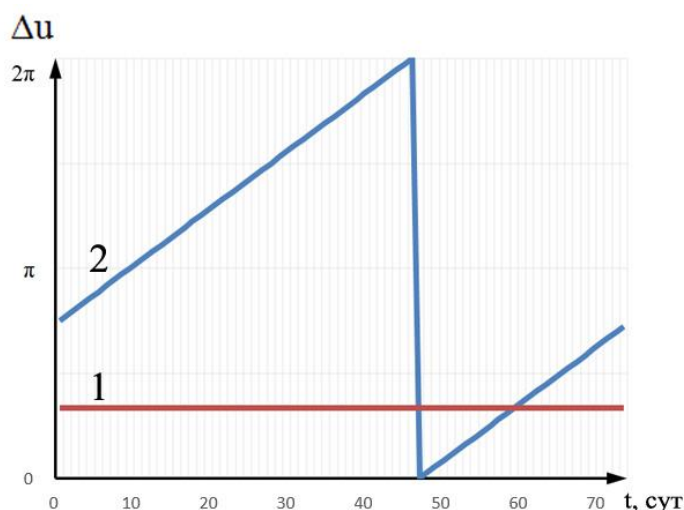


Рис. 3. График изменения углового расстояния между радиусами-векторами двух КА во времени (1 – для ОГ КА с жестко заданной баллистической структурой, 2 – для ОГ КА с нестабильной баллистической структурой)

Таким образом, ОГ КА с нестабильной баллистической структурой будет иметь следующие особенности:

- плоскости орбит отделившихся КА на момент запуска будут принадлежать плоскости опорной орбиты, а их параметры незначительно отличаться друг от друга;
- значение угловых расстояний между радиусами-векторами КА Δu_{kl} не удерживается в заданных пределах и постоянно меняется (КА будут «перемешиваться», меняя изначально заданную последовательность номеров в плоскости опорной орбиты). Исходя из этого после отделения КА от капсулы в опорной плоскости будут образованы орбиты КА таким способом, как это представлено на рис. 4, а подспутниковые точки выстроятся в линию, похожую на трассу полета КА (рис. 5).

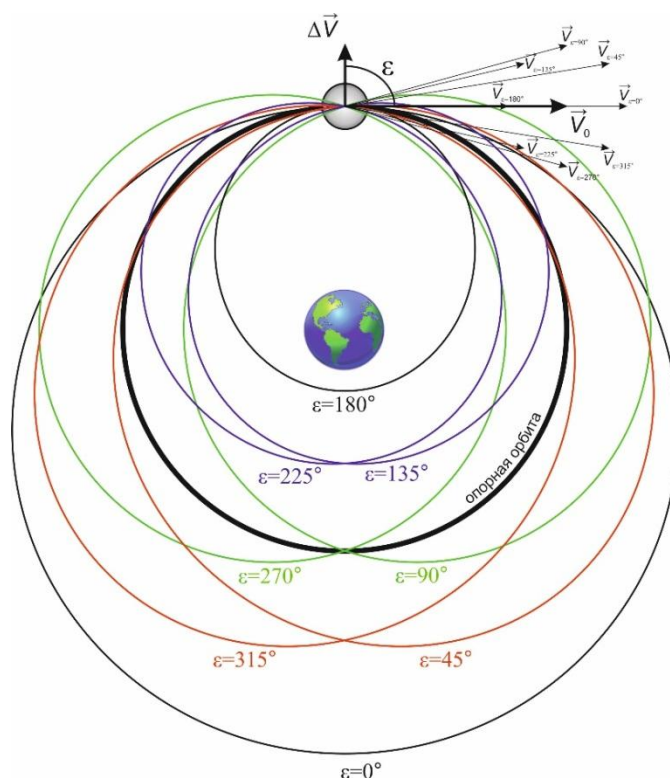


Рис. 4. Орбиты КА, отделившихся от капсулы

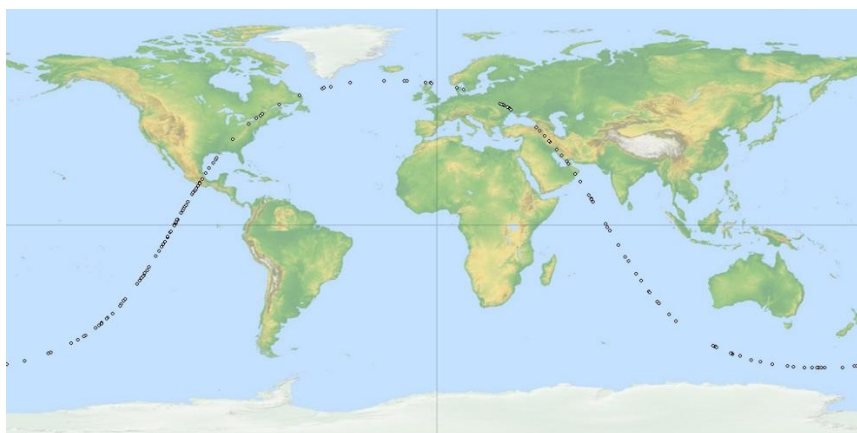


Рис. 5. Расположение подспутниковых точек КА из состава вариант ОГ КА с нестабильной баллистической структурой (наклонение опорной орбиты $i=60^\circ$, высота опорной орбиты $H=687,233$ км, количество КА $N_{КА}=150$)

Представленный на рис. 5 вариант ОГ КА с нестабильной баллистической структурой позволяет получить практически непрерывную полосу обзора земной поверхности на заданных широтах, постоянство наблюдения в которой обеспечивается только количеством КА в данной плоскости опорной орбиты.

ФОРМИРОВАНИЕ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ С НЕСТАБИЛЬНОЙ БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ

1. Исходными данными для формирования ОГ КА с нестабильной баллистической структурой являются:

количество плоскостей опорных орбит – $N_{пл}$;

количество КА в каждой плоскости опорной орбиты – $N_{КА}$;

взаимное расположение опорных орбит $\Delta\Omega_{j-1,j}$ ($j=2, \dots, N_{пл}$) вдоль экватора;

кеплеровские элементы каждой j -й опорной орбиты $\{a_j, e_j, i_j, \Omega_j, \omega_j, \tau_j\}$ ($j=1, \dots, N_{пл}$);

проекции вектора импульса скорости для каждого l -го КА $\Delta\vec{V}_{jl}^{op} \{ \Delta Vx_{jl}^{op}, \Delta Vy_{jl}^{op}, \Delta Vz_{jl}^{op} \}$ в орбитальной системе координат ($j=1, \dots, N_{пл}, l=1, \dots, N_{КА}$);

время вывода первой капсулы на опорную орбиту T_B ;

время $t_{отдj}$ начала отделения первого КА от j -й капсулы;

интервал Δt по времени между последовательными отделениями КА.

2. Допущениями при формировании ОГ КА с нестабильной баллистической структурой являются:

все опорные орбиты круговые $e_j = 0$ ($j=1, \dots, N_{пл}$);

все опорные орбиты имеют заданное наклонение $i_j = i_{зад}$ ($j=1, \dots, N_{пл}$);

каждая j -я капсула выводит одинаковое количество КА – $N_{КА}$.

Требуется определить значения параметров движения КА из состава ОГ с нестабильной баллистической структурой в гринвичской системе координат (ГСК) на момент времени отделения последнего КА от капсулы.

Решение данной задачи может быть найдено следующим образом.

Движение капсулы и отделившихся КА рассматривается в ГСК с учетом нецентральности гравитационного поля Земли, а также возмущений, вызванных воздействием Луны и Солнца. Исходя из этого движение капсулы и отделившихся КА можно описать следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \ddot{x} = -\frac{\mu x}{r^3} + j_{x_{л}} + j_{x_{нптз}} + j_{x_{с}}, \\ \ddot{y} = -\frac{\mu y}{r^3} + j_{y_{л}} + j_{y_{нптз}} + j_{y_{с}}, \\ \ddot{z} = -\frac{\mu z}{r^3} + j_{z_{л}} + j_{z_{нптз}} + j_{z_{с}}. \end{cases} \quad (3)$$

Введем следующие обозначения: l – порядковый номер КА при отделении от капсулы ($l = 1, \dots, N_{КА}$), n – количество отделившихся КА на текущий момент времени, $n = 0, l = 0$.

1. Расчет по кеплеровским элементам опорных орбит $\{a_j, e_j, i_j, \Omega_j, \omega_j, \tau_j\}$, координат и проекций скорости j -й капсулы в абсолютной геоцентрической экваториальной системе координат (АГЭСК):

$$\begin{aligned}
x_j &= r_j \cdot (\cos \Omega_j \cos u_j - \sin \Omega_j \sin u_j \cos i_j), \\
y_j &= r_j \cdot (\sin \Omega_j \cos u_j + \sin u_j \cos \Omega_j \cos i_j), \\
z_j &= r_j \cdot \sin u_j \sin i_j, \\
Vx_j &= V_{r_j} \cdot (\cos \Omega_j \cos u_j - \sin \Omega_j \sin u_j \cos i_j) - V_{\tau_j} \cdot (\cos \Omega_j \sin u_j + \cos \Omega_j \cos u_j \cos i_j), \\
Vy_j &= V_{r_j} \cdot (\sin \Omega_j \cos u_j - \cos \Omega_j \sin u_j \cos i_j) - V_{\tau_j} \cdot (\sin \Omega_j \sin u_j - \cos \Omega_j \cos u_j \cos i_j), \\
Vz_j &= V_{r_j} \sin u_j \sin i_j + V_{\tau_j} \cos u_j \sin i_j,
\end{aligned} \tag{4}$$

где $r_j = \frac{P_j}{1 + e \cos \vartheta_j}$, $V_{r_j} = \sqrt{\frac{\mu}{a_j}} e \sin \vartheta_j$, $V_{\tau_j} = \sqrt{\frac{\mu}{a_j}} (1 + e \cos \vartheta_j)$, $u_j = \vartheta_j + \omega_j$, $j = 1, \dots, N_{\text{пл}}$.

2. Перевод параметров движения j -й капсулы из АГЭСК в ГСК:

$$\begin{aligned}
x_j^\Gamma &= x_j \cos S + y_j \sin S, \\
y_j^\Gamma &= y_j \cos S - x_j \sin S, \\
z_j^\Gamma &= z_j, \\
Vx_j^\Gamma &= Vx_j \cos S + Vy_j \sin S + \omega_3 y_j^\Gamma, \quad \text{где } j = 1, \dots, N_{\text{пл}}. \\
Vy_j^\Gamma &= Vy_j \cos S - Vx_j \sin S - \omega_3 x_j^\Gamma, \\
Vz_j^\Gamma &= Vz_j,
\end{aligned} \tag{5}$$

где ω_3 – угловая скорость вращения Земли, $\omega_3 = \frac{2\pi}{T_{3B}} = 7.29 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$;

S – местное звездное время, $S = S_0 + Mk$;

S_0 – значение звездного времени на Гринвичском меридиане в гринвичскую полночь;

M – среднее солнечное время на Гринвичском меридиане;

$k = 1,0027379093$.

3. Прогнозирование движения j -й капсулы на интервале $\{T_B; t_{\text{отд}j}\}$ в соответствии с системой дифференциальных уравнений (3).

4. Отделение l -го КА j -й капсулы:

$$\begin{aligned}
l &= l + 1, \\
n &= l.
\end{aligned}$$

5. Перевод проекций импульса скорости $\Delta \vec{V}_{jl}^{\text{оп}}$ $\{\Delta Vx_{jl}^{\text{оп}}, \Delta Vy_{jl}^{\text{оп}}, \Delta Vz_{jl}^{\text{оп}}\}$ для l -го КА j -й капсулы из орбитальной системы координат в ГСК:

$$\begin{aligned}
\Delta Vx_{jl}^\Gamma &= \Delta Vx_{jl}^{\text{оп}} \cos \beta - \sin \beta (\Delta Vy_{jl}^{\text{оп}} \sin \alpha + \Delta Vz_{jl}^{\text{оп}} \cos \alpha), \\
\Delta Vy_{jl}^\Gamma &= \Delta Vy_{jl}^{\text{оп}} \cos \alpha - \Delta Vz_{jl}^{\text{оп}} \sin \alpha, \\
\Delta Vz_{jl}^\Gamma &= \Delta Vx_{jl}^{\text{оп}} \sin \beta + \cos \beta (\Delta Vy_{jl}^{\text{оп}} \sin \alpha + \Delta Vz_{jl}^{\text{оп}} \cos \alpha),
\end{aligned} \tag{6}$$

где α и β – углы поворота системы координат относительно оси Ox и Oy соответственно.

6. Определение начальных условий l -го КА j -й капсулы в ГСК:

$$\begin{aligned}
 x_{jl}^{\Gamma} &= x_j^{\Gamma}, \\
 y_{jl}^{\Gamma} &= y_j^{\Gamma}, \\
 z_{jl}^{\Gamma} &= z_j^{\Gamma}, \\
 Vx_{jl}^{\Gamma} &= Vx_j^{\Gamma} + \Delta Vx_{jl}^{\Gamma}, \\
 Vy_{jl}^{\Gamma} &= Vy_j^{\Gamma} + \Delta Vy_{jl}^{\Gamma}, \\
 Vz_{jl}^{\Gamma} &= Vz_j^{\Gamma} + \Delta Vz_{jl}^{\Gamma},
 \end{aligned} \tag{7}$$

где $j = 1, \dots, N_{\text{пл}}, l = 1, \dots, N_{\text{КА}}$.

7. Прогнозирование движения j -й капсулы и n КА на интервале $\{t_{\text{отд } j} + (n-1) * \Delta t; t_{\text{отд } j} + n * \Delta t\}$.

Пункты 4–7 выполняются до тех пор, пока не отделится последний КА, т. е. $l = N_{\text{КА}}$.

8. Вывод по результатам: параметры движения $N_{\text{КА}}$ КА в ГСК на момент времени отделения последнего КА от капсулы.

Схема формирования ОГ КА с нестабильной баллистической структурой для j -й опорной орбиты представлена на рис. 6.



Рис. 6. Схема формирования ОГ КА с нестабильной баллистической структурой

Реализация представленной схемы позволяет получить значения параметров движения каждого КА из состава ОГ с нестабильной баллистической структурой на момент отделения последнего КА от капсулы.

Полученные параметры движения КА позволяют осуществить прогнозирование их движения. В процессе прогнозирования можно определять промежутки времени, в течение которых образуются кластеры КА. В случае, если в зоне обзора кластера КА находится ИРИ, его местоположение можно определить, используя известные методы.

В зависимости от измеряемых параметров, характеризующих относительное положение кластера КА и ИРИ, различают несколько методов определения его местоположения: дальномерный, квазидальномерный, разностно-дальномерный, угломерный (пеленгационный), дальномерно-угломерный, доплеровский и комбинированный методы. Использование кластера КА позволяет оперативно получать и передавать координаты ИРИ в реальном режиме времени.

На основе применяемого метода будут формироваться требования по взаимному расположению и расстоянию между КА, а также по их количеству. Из группы КА, движущейся над ИРИ, с помощью специальных алгоритмов выбирается такой кластер, который обеспечит наибольшую точность определения местоположения ИРИ (рис. 7).



Рис. 7. Подспутниковые точки кластера КА над районом ИРИ и образованный кластер КА

Таким образом, применение кластеров КА из состава ОГ с нестабильной баллистической структурой позволяет обеспечить оперативное решение задачи определения местоположения ИРИ. Достоинствами предложенного принципа являются:

- возможность применения однотипных малых КА с возможностью их серийного производства;
- отсутствие на КА двигательных установок с топливом для проведения коррекции орбит;
- возможность оперативного определения местоположения ИРИ кластерами КА;
- выход из строя одного или нескольких КА практически не повлияет на качество решения задачи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен новый принцип формирования ОГ КА для решения задачи определения местоположения ИРИ, в котором не требуется жесткого удержания взаимного расстоя-

ния между КА в заданных пределах и, как следствие, отсутствует необходимость в коррекции их орбит. Для такой ОГ КА введено понятие нестабильной баллистической структуры, суть которой заключается в том, что один или несколько элементов баллистической структуры не удерживаются в заданных значениях. В случае, приведенном в работе, не удерживается угловое расстояние между радиусами-векторами КА.

За счет незначительных отличий в параметрах орбит отделившихся КА образуются кластеры, характеризующиеся взаимным расположением и расстоянием между КА в заданных пределах. Пространственные конфигурации кластеров КА, построенные определенным образом, позволяют оперативно определить местоположение ИРИ на поверхности Земли известными методами.

На основании предложенной схемы формирования ОГ КА с нестабильной баллистической структурой представляется возможным получить значения параметров движения каждого КА на момент времени отделения последнего КА от капсулы. На основании полученных значений параметров движения КА выполняется прогноз их движения и проводится анализ пространственного взаимного положения КА над районом, где располагается ИРИ.

Список используемых источников

1. Власов С.А., Житников Т.А., Кульвиц А.В. Формирование облика баллистически связанной группы космических аппаратов наблюдения земной поверхности // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2016. – Вып. 651. – С. 113–119.
2. Формирование структуры баллистически связанной группы космических аппаратов дистанционного зондирования Земли / Н.Ф. Аверкиев [и др.] // Научные технологии в космических исследованиях Земли. – 2016. – Т. 8, № 4. – С. 11–16.
3. Аверкиев Н.Ф., Кульвиц А.В., Хасанов А.Ю. Вероятностный подход к формированию баллистически связанных групп космических аппаратов // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 665. – С. 157–166.
4. Баллистические основы проектирования ракет-носителей и спутниковых систем / Н.Ф. Аверкиев [и др.]. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2017. – 302 с.

С.А. Богачёв,
кандидат технических наук, доцент;
С.А. Власов,
кандидат технических наук, доцент;
И.Ю. Кубасов,
кандидат технических наук

ПЕРИОДИЧНОСТЬ ОБЗОРА КОСМИЧЕСКИМ АППАРАТОМ ЗАДАННОЙ ПАРАЛЛЕЛИ С ВОСХОДЯЩЕЙ ИЛИ НИСХОДЯЩЕЙ ЧАСТИ ОРБИТЫ

Представлены аналитические зависимости оценивания периодичности обзора КА заданной параллели только с восходящей или только с нисходящей части орбиты. Показателем периодичности является максимальная длительность перерыва в обзоре всех точек параллели, выраженная в числе суток и витков. Зависимости представлены для числа витков в сутки, совершаемых КА более одного витка, и значения ширины полосы обзора без ограничений.

Ключевые слова: периодический обзор поверхности Земли, полоса обзора, суточный сдвиг, укладка полос обзора.

ВВЕДЕНИЕ

Орбитальные группировки периодического обзора земной поверхности являются одними из самых широко используемых и в нашей стране, и за рубежом. Их особенностью является разрыв (отсутствие непрерывности) в обзоре точек заданной области. Величина этого временного интервала зависит от многих факторов: параметров орбиты КА, характеристик аппаратуры обзора, расположения наблюдаемой точки, условий наблюдения. В качестве показателя результативности функционирования таких систем, в первую очередь, используется периодичность обзора, под которой понимают максимальный разрыв в обзоре, определяемый по всем точкам обслуживаемой области.

Расчету данного показателя посвящено много работ. В дополнение к приведенному в книге [1] неполному списку подобных работ можно добавить [2–13]. В статье [1] отмечено, что «в целом правомерно считать, что проблема расчета периодичности практически решена». Различные способы расчета, при получении одного и того же конкретного результата, обладают и отличающимися свойствами самих методов расчета: возможностью графической интерпретации и обобщения результатов, вычислительными затратами, удобством дальнейшего использования для оптимизации обзора выбором параметров орбит и т. д.

Укладка полос обзора и, соответственно, периодичность обзора с восходящей или нисходящей части орбиты описаны в одной из первых работ по проектированию систем КА [2], но не для всего диапазона возможных значений ширины полос обзора.

Расчет периодичности обзора, в том числе и функция распределения величины разрыва, с восходящей или нисходящей части орбиты рассмотрен и в работе [1]. Ограничения по значениям ширины полос обзора здесь сняты. Векторный метод, предлагаемый в [1], позволяет быстро рассчитать, в частности, максимальный разрыв в обзоре для каждого набора исходных данных, но не дает «общего представления» об областях с одинаковой периодичностью.

В одной из первых работ по расчету периодичности обзора [3] предложенный метод также не имеет ограничений по величине зоны обзора КА (фронтальной группы) и высотам полета КА, аналитически учитывает прецессию линии узлов, использует простые расчетные формулы, обладает хорошим графическим представлением и обобщением результатов. Причем в [3] учитывается одновременно обзор как на восходящей, так и на нисходящей частях орбит

(в статье [1] такой вид обзора назван двусторонним), а это существенно более сложный вариант по сравнению с обзором только на одной из этих частей орбит.

Настоящая работа направлена на расширение области применения ранее предложенного метода [3] по расчету периодичности обзора заданной параллели именно с восходящей или нисходящей части орбиты при сохранении «обобщающих» свойств.

Проведение обзора только на восходящей или нисходящей части орбиты характерно, например, для орбитальных группировок КА, для которых необходим учет освещенности земной поверхности Солнцем.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

По аналогии с работой [3] рассмотрим процесс обзора одним КА или одной фронтальной группой (ФГ) КА заданной параллели. В издании [3] под фронтальной группой понимается совокупность КА расположенных на одной широте на орбитах одинаковых радиусов и наклонений, зоны обзора которых соприкасаются на экваторе. Учитывая особенности укладки полос обзора только с восходящей или с нисходящей частями орбиты, в данной работе фронтальная группа – это совокупность КА, которые находятся на орбитах одинаковых радиусов и наклонений, формирующих на заданной параллели Ψ совместную полосу обзора шириной $\Delta\lambda_\Psi$ и движущихся в одном направлении (рис. 1).

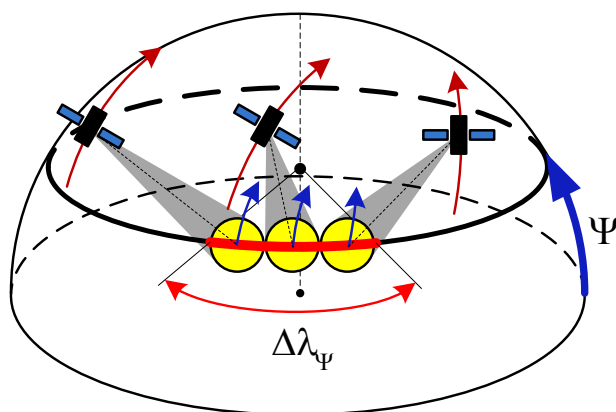


Рис. 1. Фронтальная группа

Если в качестве параллели задан экватор, то при определенных условиях [3] периодичность обзора точек экватора будет соответствовать периодичности глобального обзора.

Как уже указывалось выше, периодичность обзора зависит от множества факторов, но в обобщенном виде их можно представить в виде двух параметров, к которым относятся:

- 1) ширина полосы обзора на параллели с заданной широтой Ψ - $\Delta\lambda_\Psi$;
- 2) число витков, которое КА совершает вокруг Земли за одни сутки – α .

Таким образом, в статье рассматривается задача поиска зависимости f между временем разрыва периодического обзора заданной параллели с восходящей или нисходящей части орбиты Δt_1 при заданных ширине полосы обзора на параллели $\Delta\lambda_\Psi$ и числе витков, совершаемых КА за одни сутки α :

$$\Delta t_1 = f(\Delta\lambda_\Psi, \alpha).$$

При этом на $\Delta\lambda_\Psi$ ограничений не накладывается, значение α соответствует диапазону орбит от геостационарных ($\alpha=1$) до низких ($\alpha \approx 16$). Функция f ищут на основе подхода, разработанного в работе [3].

ПЕРИОДИЧНОСТЬ ОБЗОРА ПРИ ШИРИНЕ ПОЛОСЫ ОБЗОРА, БОЛЬШЕЙ МЕЖВИТКОВОГО СДВИГА

На каждом витке орбиты КА (ФГ) будет просматривать часть заданной параллели величины $\Delta\lambda_\psi$. От витка к витку, в соответствии со сдвигом трассы полета, просмотренная часть будет смещаться на межвитковый сдвиг $\Delta\lambda_{\text{МВ}}$. Сдвиг просмотренной части параллели (полосы обзора) на соседних сутках определяется суточным сдвигом $\Delta\lambda_{\text{С}}$. Формулы для расчета величин сдвигов (по модулю, без учета знака) приведены ниже:

$$\begin{aligned} \Delta\lambda_{\text{МВ}} &= \frac{2\pi}{\alpha}, \\ \Delta\lambda_{\text{С}} &= (1 - \{\alpha\}) \cdot \Delta\lambda_{\text{МВ}}, \\ \alpha &= T_{\text{эф}} / T_{\Omega}, \end{aligned} \quad (1)$$

где α – число витков, которое КА совершает за одни эффективные сутки $T_{\text{эф}}$ (интервал времени, за который Земля совершает один полный оборот вокруг своей оси вращения относительно прецессирующего узла орбиты);

T_{Ω} – драконический период обращения КА;

$\{\alpha\}$ – операция вычисления дробной части числа α .

Введем связанный с суточным сдвигом $\Delta\lambda_{\text{С}}$ дополнительный сдвиг $\Delta\lambda'_{\text{С}}$, дополняющий его до межвиткового сдвига [рис. 2; цифры внутри полос обзора соответствует номеру витка в сутках и суткам (в скобках) обзора]:

$$\Delta\lambda'_{\text{С}} = \Delta\lambda_{\text{МВ}} - \Delta\lambda_{\text{С}} = \{\alpha\} \cdot \Delta\lambda_{\text{МВ}} = 2\pi \lfloor \alpha \rfloor \cdot \Delta\lambda_{\text{МВ}},$$

где $\lfloor \alpha \rfloor$ – операция усечения числа до целого значения (отбрасывается дробная часть).

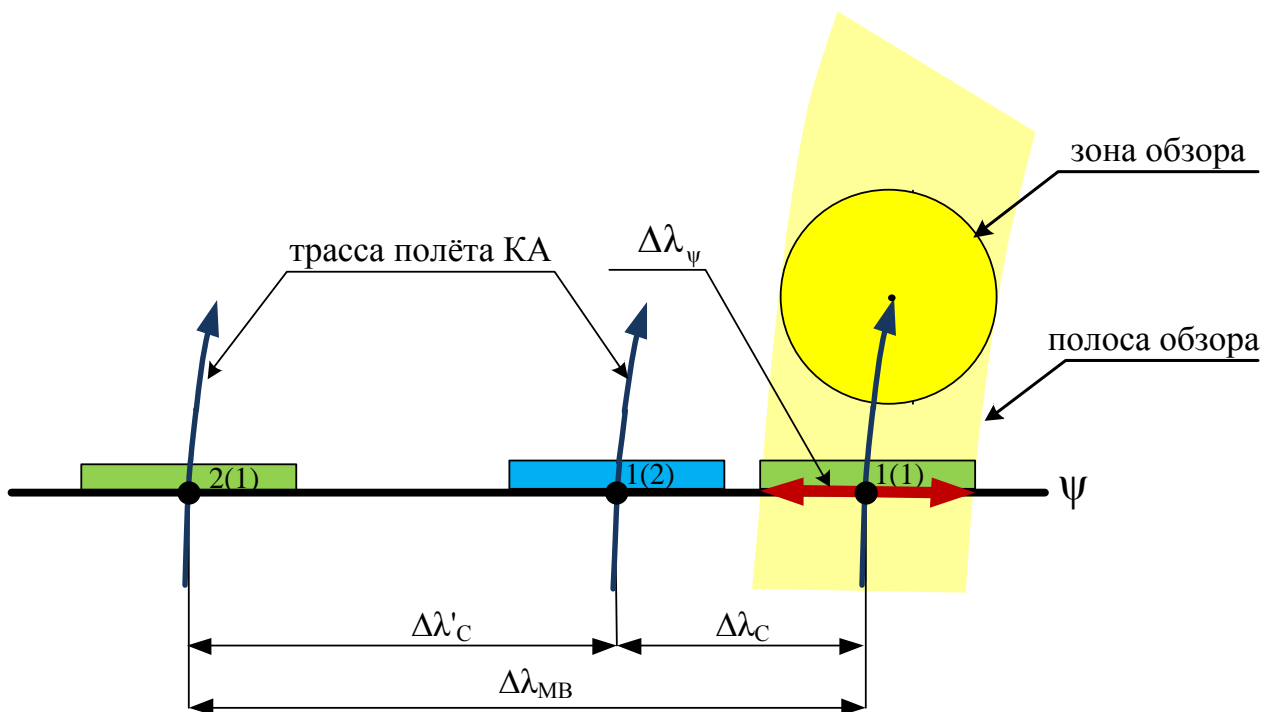


Рис. 2. Межвитковый и суточные сдвиги

Графики изменения приведенных сдвигов как функции числа витков α представлены на рис. 3 ($\Delta\lambda_{\text{МВ}}$ – красный, $\Delta\lambda_{\text{С}}$ – зеленый, $\Delta\lambda'_{\text{С}}$ – оранжевый).

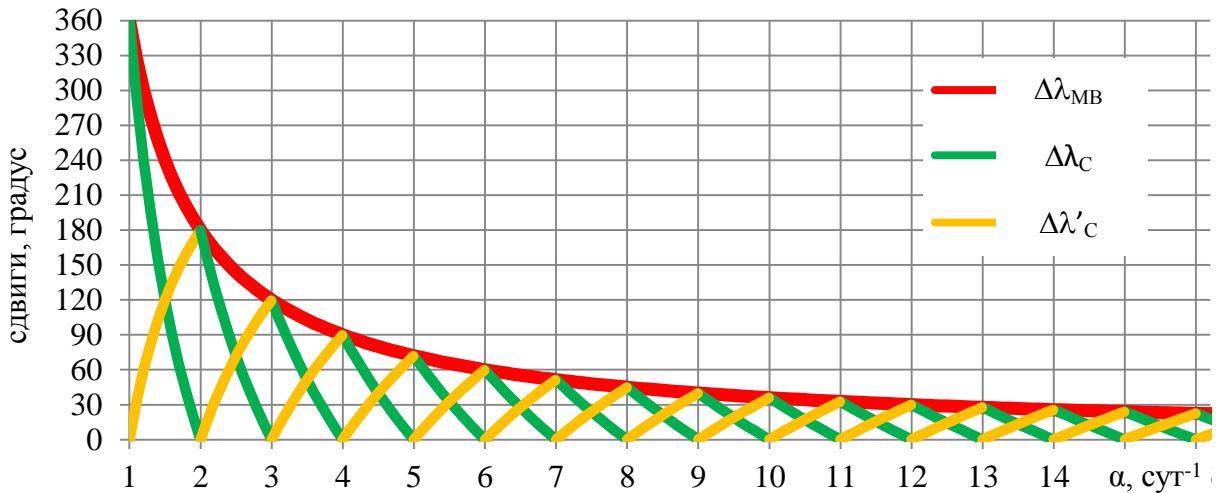


Рис. 3. Изменение межвиткового и суточных сдвигов

В зависимости от величины ширины полосы обзора фронтальной группы $\Delta\lambda_{\Psi}$ (в частном случае фронтальная группа может состоять и из одного КА) возможны следующие шесть случаев (терминология, обозначения, схема вывода во многом соответствуют работе [3]).

1-й случай: $\Delta\lambda_{\Psi}=2\pi$.

На каждом витке, т. е. через один период, будет просматриваться вся параллель. Периодичность обзора Δt_1 будет определяться выражением

$$\Delta t_1 = T_{\Omega}. \quad (2)$$

2-й случай: $\Delta\lambda_{\text{МВ}} + \Delta\lambda'_{\text{С}} \leq \Delta\lambda_{\Psi} < 2\pi$.

Уменьшение ширины полосы обзора $\Delta\lambda_{\Psi}$ от величины 2π на каждое межвитковое расстояние $\Delta\lambda_{\text{МВ}}$ будет приводить к появлению дополнительного непросмотренного участка параллели на такую же величину, что потребует на просмотр каждого дополнительного «окна» в $\Delta\lambda_{\text{МВ}}$ и дополнительного витка (увеличения периодичности на один период обращения).

Таким образом, этот случай следует разделить на несколько подслучаев, в зависимости от кратности k , в которой происходит уменьшение ширины полосы обзора для 1-го случая (2π) на $\Delta\lambda_{\text{МВ}}$:

$$\begin{aligned} \Delta\lambda_{\text{МВ}} + \Delta\lambda'_{\text{С}} &\leq \Delta\lambda_{\Psi} < 2\pi - k \cdot \Delta\lambda_{\text{МВ}}, \\ \Delta\lambda_{\text{МВ}} + \Delta\lambda'_{\text{С}} &= 2\pi - (k+1) \cdot \Delta\lambda_{\text{МВ}}. \end{aligned}$$

Соответствующая периодичность обзора Δt_1 будет определяться выражением

$$\Delta t_1 = (k+1) \cdot T_{\Omega}, \quad (3)$$

где $k=1, 2, \dots, \lfloor \alpha \rfloor - 1$.

3-й случай: $\Delta\lambda_{\text{МВ}} \leq \Delta\lambda_{\Psi} < \Delta\lambda_{\text{МВ}} + \Delta\lambda'_{\text{С}} = 2\pi - (\lfloor \alpha \rfloor - 1) \cdot \Delta\lambda_{\text{МВ}}$.

Наибольшая кратность k , при которой еще, не во всем диапазоне $\Delta\lambda_{\Psi}$, можно выполнить условие $\Delta\lambda_{\Psi} \geq \Delta\lambda_{\text{МВ}}$ равна $k_{\text{max}} = \lceil \alpha \rceil$, где $\lceil \alpha \rceil$ — операция преобразования вещественного числа в ближайшее неменьшее целое число (например: $\lceil 15.01 \rceil = 16$, $\lceil 15.99 \rceil = 16$, $\lceil 16.00 \rceil = 16$).

Периодичность обзора Δt_1 можно определить выражением

$$\Delta t_1 = \lceil \alpha \rceil \cdot T_{\Omega}, \quad (4)$$

Соответствующие указанным трем случаям области приведены на рис. 4 (число в круге обозначает номер описанного выше случая, соседние области выделены чередующимися цветами, области для 3-го случая имеют более темную заливку).

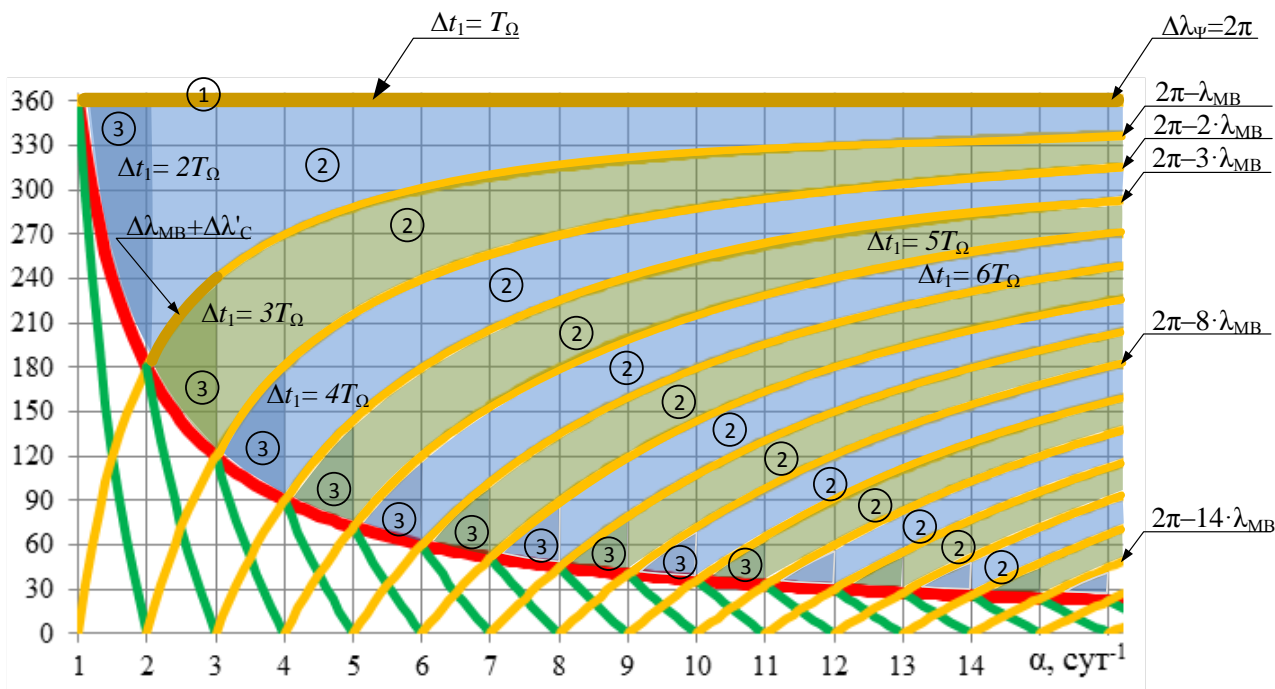


Рис. 4. Области одинаковых разрывов

ПЕРИОДИЧНОСТЬ ОБЗОРА ПРИ ШИРИНЕ ПОЛОСЫ ОБЗОРА, МЕНЬШЕЙ МЕЖВИТКОВОГО СДВИГА

Для оставшихся 4–6 случаев выполняется общее условие $\Delta\lambda_{\Psi} \leq \Delta\lambda_{MB}$. Соответствующие области также показаны на рис. 4. Для лучшего представления картины обзора фрагмент на рис. 4, представляющий в увеличенном масштабе области именно для 4–6 случаев, помещен и на рис. 5 (обозначение случаев аналогично рис. 4).

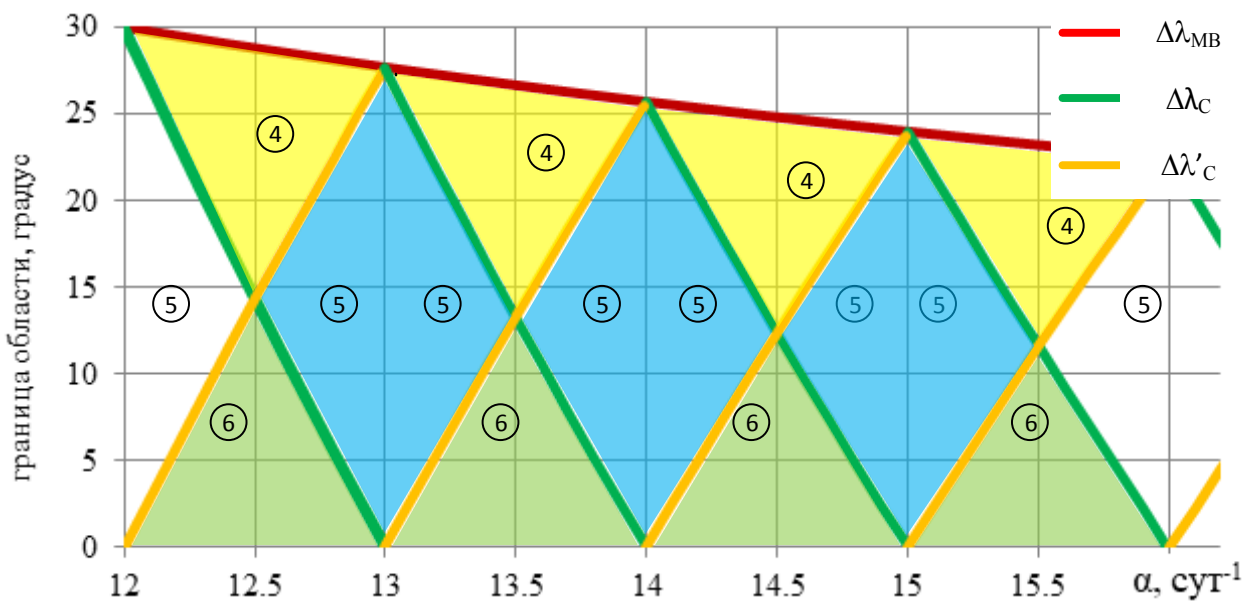


Рис. 5. Области разрывов для 4–6 случаев

4-й случай: $\max(\Delta\lambda_C, \Delta\lambda'_C) \leq \Delta\lambda_\Psi < \Delta\lambda_{MB}$.

Через двое суток ($C=2$) вся параллель будет поделена подспутниковыми точками на восходящих или нисходящих частях орбиты на участки длиной $\Delta\lambda_C$ и $\Delta\lambda'_C$, которые за этот же интервал времени будут покрыты полосами обзора большей ширины, чем эти участки. Если выразить периодичность в витках, то за эти двое суток пройдут $2\lfloor\alpha\rfloor+1$ витков, т. е.

$$\Delta t_1 = (2\lfloor\alpha\rfloor+1) \cdot T_\Omega. \quad (5)$$

5-й случай: $\min(\Delta\lambda_C, \Delta\lambda'_C) \leq \Delta\lambda_\Psi < \max(\Delta\lambda_C, \Delta\lambda'_C)$.

Пример картины покрытия одного межвиткового интервала (для всех интервалов картина аналогична) для этого случая показан на рис. 6 (оцифровка горизонтальной оси проведена в межвитковых расстояниях, обозначения внутри полос обзора аналогичны обозначениям на рис. 2).

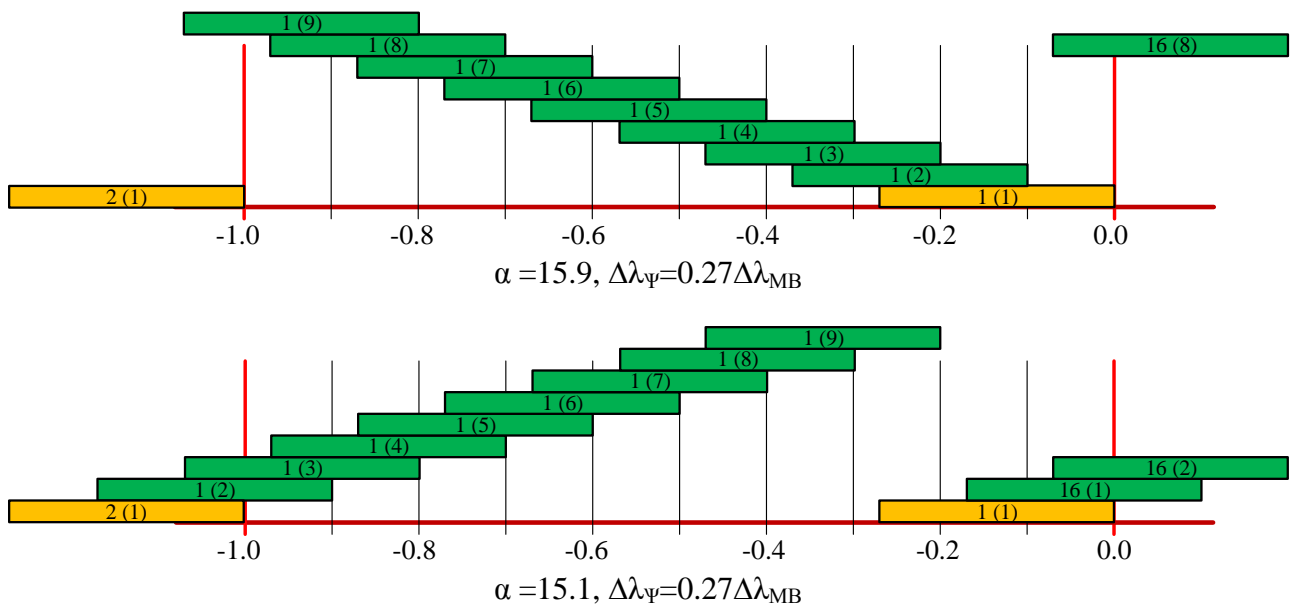


Рис. 6. Покрытие межвиткового интервала в 5-м случае

Начиная с двух суток (за первые – вся параллель будет разделена на межвитковые интервалы), начнется закрытие оставшейся части межвиткового интервала $\Delta\lambda_{MB} - \Delta\lambda_\Psi$ каждые сутки на $\Delta\lambda$. Общая длительность в сутках составит

$$C = \left\lceil \frac{\Delta\lambda_{MB} - \Delta\lambda_\Psi}{\Delta\lambda} \right\rceil + 1. \quad (6)$$

6-й случай: $\Delta\lambda_\Psi < \min(\Delta\lambda_C, \Delta\lambda'_C)$.

В этом случае картина наложения полос обзора будет отличаться от предыдущего тем, что перекрытие полос начнется позже двух суток.

Пример наложения полос обзора приведен на рис. 7. На нем в соответствии с угловым положением полос обзора представлено их расположение вдоль заданной параллели. Синим цветом отмечены полосы, сформированные в течение одних суток. Для остальных полос также учтено и угловое положение, и сутки формирования. Рисунок еще раз иллюстрирует идентичность наложения для каждого из межвитковых интервалов.

При тех же исходных данных расположение полос обзора на одном межвитковом интервале показано на рис. 8 (по оси абсцисс – долгота, нормированная по $\Delta\lambda_{MB}$, по оси ординат – номер витка).

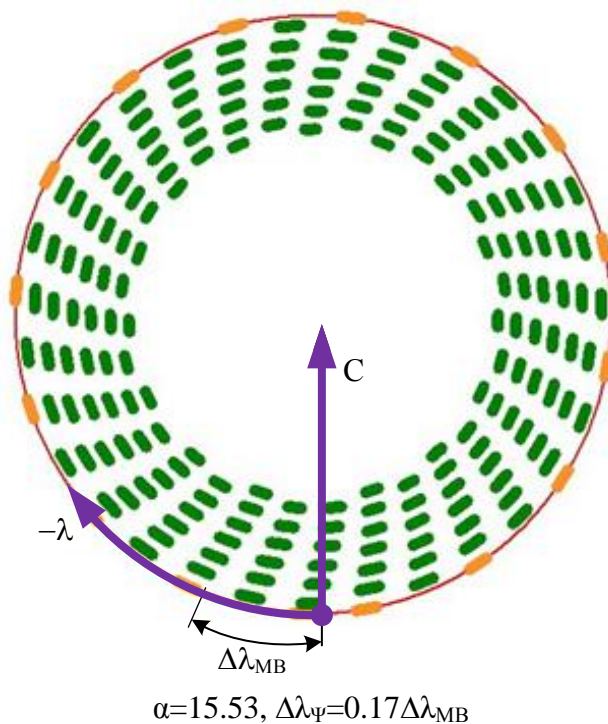


Рис. 7. Покрытие параллели в 6-м случае

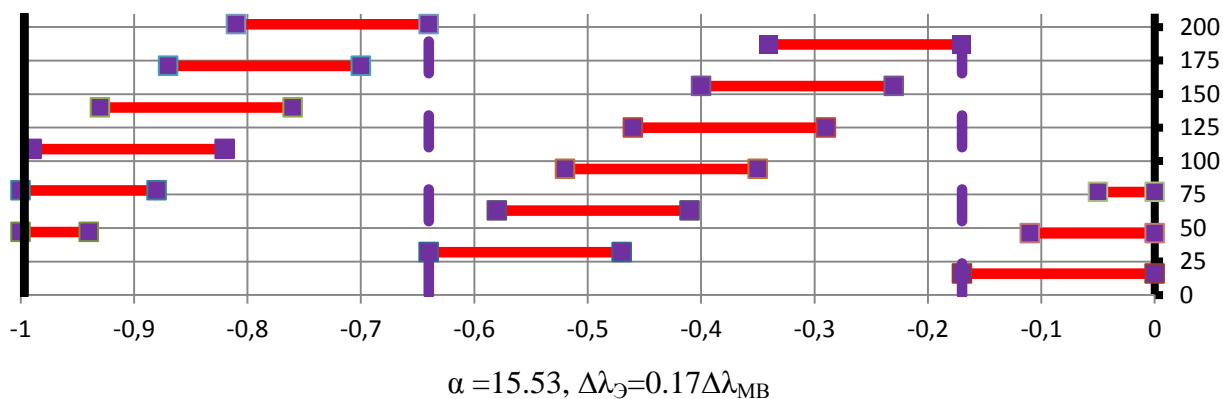


Рис. 8. Покрытие межвиткового интервала в 6-м случае

По аналогии с работой [3] периодичность обзора для 6-го случая в сутках может быть вычислена по следующей схеме:

1. Перебирается натуральное число j от 1 до выполнения двух нижеописанных условий.
2. Для очередного j рассчитываются параметры:

$$q_j = \left\lfloor \frac{j \cdot \Delta\lambda_{\text{МВ}}}{\Delta\lambda} \right\rfloor, k_j = \left\{ \frac{j \cdot \Delta\lambda_{\text{МВ}}}{\Delta\lambda} \right\}, \Delta\lambda_j = k_j \cdot \Delta\lambda, \Delta\lambda'_j = (1 - k_j) \cdot \Delta\lambda \quad (7)$$

3. Проверяются условия:
 - 1-е условие – $\Delta\lambda_j \leq \Delta\lambda_{\psi}$. При выполнении условия значения j и q_j переприсваиваются переменным j_1 и q_{j1} .
 - 2-е условие – $\Delta\lambda'_j \leq \Delta\lambda_{\psi}$. При выполнении условия значения j и q_j переприсваиваются переменным j_2 и q_{j2} .

4. После первого выполнения обоих условий периодичность обзора в сутках может быть рассчитана по формуле

$$C = q_{j1} + q_{j2} + 1.$$

Анализируя рассмотренные случаи, можно сделать вывод, что периодичность обзора при достижении некоторых границ изменения числа витков α и ширины полосы обзора $\Delta\lambda_{\Psi}$ меняется скачкообразно на целое число витков (суток). В работе [3] отмечаются важные свойства областей неизменности периодичности.

В пространстве параметров $\alpha - \Delta\bar{\lambda}_{\Psi}$, где

$$\Delta\bar{\lambda}_{\Psi} = \frac{\Delta\lambda_{\Psi}}{\Delta\lambda_{\text{МВ}}}$$

– нормированная ширина полосы обзора, области, в которых периодичность не меняется, являются треугольниками. На рис. 9 приведен пример ряда таких областей.

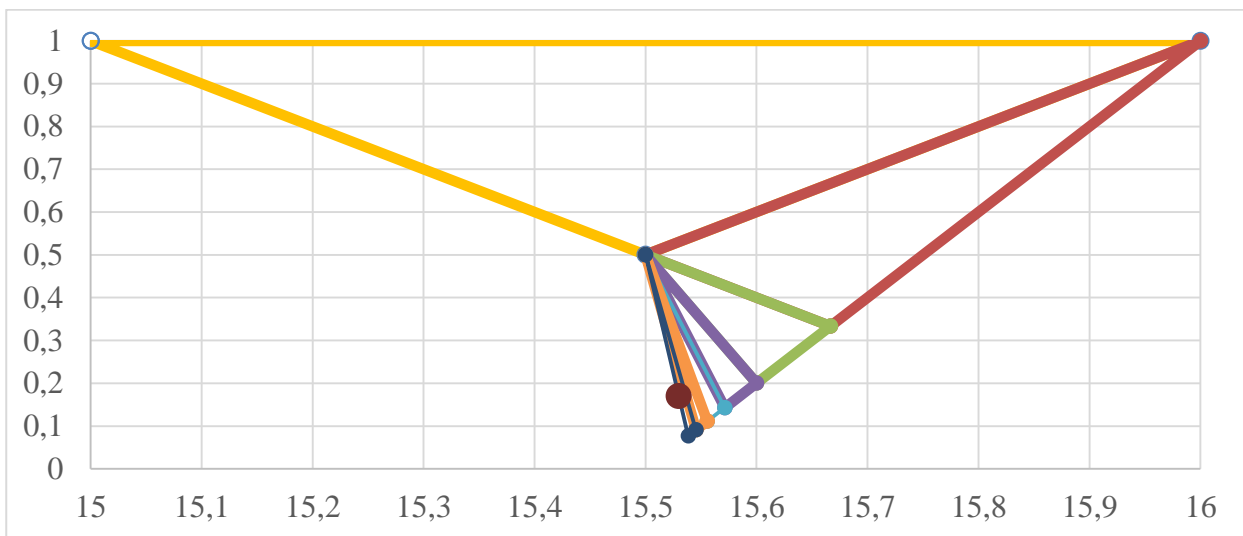


Рис. 9. Области неизменной периодичности

Каждой вершине таких треугольников можно сопоставить в соответствие два целых взаимно простых числа p и q . Эти числа определяют число витков, совершаемых КА за одни эффективные сутки $\alpha = p/q = T_{\text{эф}}/T_{\Omega}$, а также нормированную ширину полосы обзора $\Delta\bar{\lambda}_{\Psi} = 1/q$.

При уменьшении ширины полосы обзора $\Delta\bar{\lambda}_{\Psi}$ и неизменном α точка исходных данных $(\alpha, \Delta\bar{\lambda}_{\Psi})$ в указанном пространстве переходит из одного треугольника в другой. Зная параметры левой p_1 и q_1 и правой p_2 и q_2 вершин, легко рассчитать и параметры нижней вершины p и q треугольной области, т. е.

$$p = p_1 + p_2, \quad q = q_1 + q_2, \quad (8)$$

а также периодичности, выраженной в сутках, т. е.

$$C = C_1 + C_2. \quad (9)$$

Кроме того, периодичность в витках для каждой области можно рассчитать по формуле

$$\Delta t_1 = p \cdot T_{\Omega}. \quad (10)$$

Пример нахождения треугольника, соответствующего исходным данным $\alpha = 15,53$, $\Delta\lambda_{\Psi} = 0,17\Delta\lambda_{\text{МВ}}$, показан на рис. 10. Это фрагмент рис. 9.

Исходным, самым верхним, треугольником здесь является треугольник с параметрами (15,1)-(31,2)-(16,1). Параметры этого и остальных треугольников, вплоть до треугольника, включающего исходные данные, представлены в табл. 1.

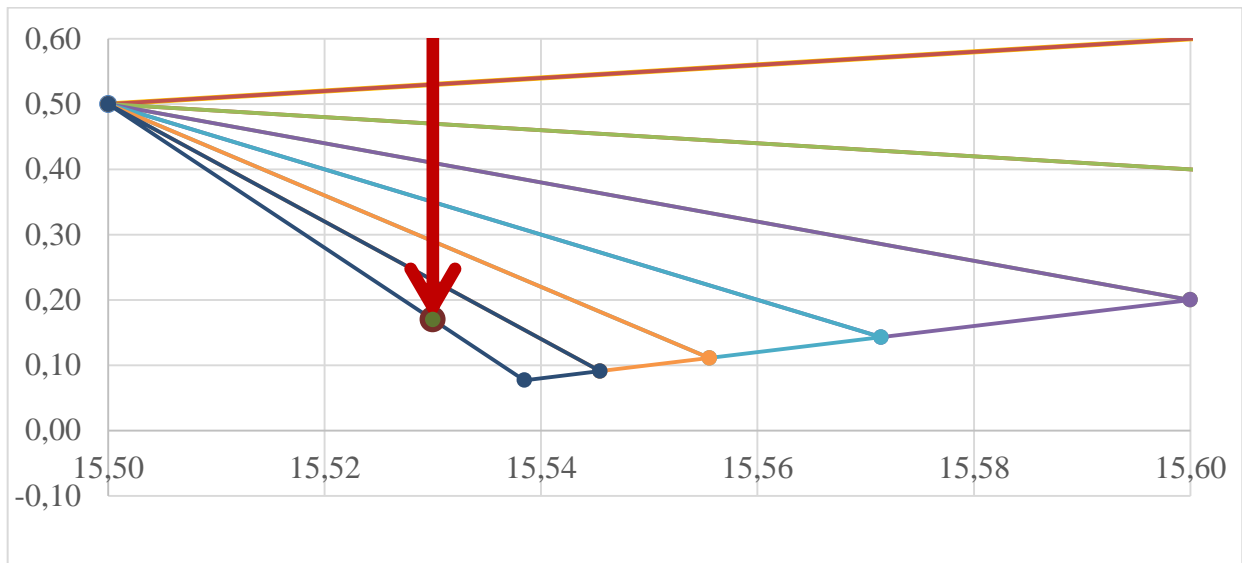


Рис. 10. Последовательность областей для $\alpha=15.53$, $\Delta\lambda_{\Psi}=0.17\Delta\lambda_{\text{МВ}}$

Таблица 1

Параметры последовательности областей для $\alpha=15.53$, $\Delta\lambda_{\Psi}=0.17\Delta\lambda_{\text{МВ}}$

Номер треуголь- ника	Левая вершина		Нижняя вершина			Правая вершина		Периодичность	
	p_1	q_1	p	q	$\Delta\bar{\lambda}_{\Psi}$	p_2	q_2	Δt_1 , витки	C , сутки
1	15	1	31	2	0.5	16	1	31	2
2	31	2	47	3	0.33	16	1	47	3
3	31	2	78	5	0.20	47	3	78	5
4	31	2	109	7	0.14	78	5	109	7
5	31	2	140	9	0.11	109	7	140	9
6	31	2	171	11	0.09	140	9	171	11
7	31	2	202	13	0.07	171	11	202	13

Представленная методика «спуска по ординате» до треугольника, включающего исходные данные $(\alpha, \Delta\bar{\lambda}_{\Psi})$, по параметрам нижней вершины p и q найденной треугольной области позволяет легко рассчитать и периодичность обзора – $\Delta t_1 = p \cdot T_{\Omega}$, $C = q$. Если исходные данные соответствуют вершине треугольника, то при этих данных формируется так называемая критическая орбита. Для нее ширина полосы обзора для полученной периодичности будет наименьшая, а сами полосы обзора будут укладываться оптимальным образом – встык. Дальнейшее уменьшение ширины полосы обзора приведет к образованию непросматриваемых участков параллели (при любой продолжительности обзора).

По аналогии с работой [3] с использованием введенных чисел $j_1, q_{j_1}, j_2, q_{j_2}$ можно вывести и формулы для прямого расчета параметров нижней вершины треугольника, включающего исходные данные $(\alpha, \Delta\lambda_{\varphi})$, и, соответственно, периодичности:

$$\begin{aligned}
 C &= q_{j_1} + q_{j_2} + 1, \\
 q &= C, \\
 p &= \begin{cases} (\lfloor \alpha \rfloor + 1) \cdot C - j_1 - j_2, & \text{если } \{\alpha\} > 0.5, \\ \lfloor \alpha \rfloor \cdot C + j_1 + j_2, & \text{если } \{\alpha\} < 0.5, \end{cases} \\
 \Delta t_1 &= p \cdot T_{\Omega}.
 \end{aligned} \tag{11}$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлены разработанные аналитические зависимости периодичности обзора космическим аппаратом заданной параллели с восходящей или нисходящей части орбиты от ширины полосы обзора на этой параллели и числа витков, совершаемых КА за одни эффективные сутки вокруг Земли.

В качестве показателя периодичности используется максимальный разрыв в обзоре по всем точкам заданной параллели. Приведенные выше исходные данные – ширина полосы, число витков – позволяют в обобщенном виде учесть практически все исходные факторы, определяющие периодичность. На диапазон изменения исходных данных не накладывается ограничений.

Использование в приведенных зависимостях эффективных суток и драконического периода обращения КА позволяет учесть влияние полярного сжатия Земли на движение КА.

Разработанные аналитические зависимости определяют в пространстве исходных параметров области неизменности периодичности обзора. Такое представление (аналогичное представлению, приведенному в работе [3]) позволяет без дальнейшего проведения расчетов определять характер изменения периодичности обзора при изменении исходных данных.

Список используемых источников

1. Горбунов А.В., Саульский В.К. Векторный метод анализа спутниковых структур // Вопросы электромеханики: тр. ВНИИЭМ. – 2015. – Т. 147, № 4. – С. 18–28.
2. Баринев К.Н., Бурдаев М.Н., Мамон П.А. Динамика и принципы построения орбитальных систем космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 1975. – 232 с.
3. Власов С.А. Расчет систем космических аппаратов периодического обзора поверхности Земли. – Л.: ВИКИ им. А.Ф. Можайского, 1987. – 32 с.
4. Власов С.А., Мамон П.А. Теория полета космических аппаратов: учебник. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2007.
5. Власов С.А., Кубасов И.Ю., Селин В.А. Расчет структуры системы периодического наблюдения заданного района на поверхности Земли // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2010. – Вып. 627. – С. 42–44.
6. Власов С.А., Кисилев В.В., Кульвиц А.В. Анализ вариантов баллистического построения систем космических аппаратов периодического обзора заданного района земной поверхности // Актуальные проблемы защиты и безопасности: тр. Восемнадцатой Всероссийской научно-практической конференции РАРАН. – СПб.: НПО специальных материалов, 2015. – С. 441–444.
7. Власов С.А., Кубасов И.Ю., Салов В.В. Способ расчета баллистической структуры системы космических аппаратов периодического наблюдения поверхности Земли // Там же. – С. 444–447.

8. Маневрирование космическим аппаратом с целью улучшения характеристик наблюдения района поверхности Земли / Н.Ф. Аверкиев [и др.] // Известия вузов. Приборостроение. – 2015. – Т. 58, № 10. – С. 798–803.
9. Обоснование параметров резервных орбит при выведении космического аппарата в случае возникновения нештатных условий / Н.Ф. Аверкиев [и др.] // Известия Самарского научного центра РАН. – 2019. – Т. 21, № 1.
10. Баллистические основы проектирования ракет-носителей и спутниковых систем / Н.Ф. Аверкиев [и др.]. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2017. – 302 с.
11. Использование орбитальных карт для разработки метода расчета показателей качества спутниковых систем при обзоре широтных поясов Земли / В.И. Горбулин [и др.] // Информация и космос. – 2009. – № 4. – С. 66–73.
12. Горбулин В.И., Зозуля Л.П., Чернявский В.А. Применение кватернионов для аналитического расчета интервалов наблюдения спутником заданного объекта // Информация и космос. – 2009. – № 3. – С. 62–66.
13. Саульский В.К. Использование «слеодограмм» для расчета периодичности землеобзора // Исследование Земли из космоса. – 1994. – № 2. – С. 65–74.

М.С. Бродский;
В.В. Звонарев,
кандидат технических наук;
А.С. Попов,
доктор технических наук, профессор

МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТНОГО ПРОСТРАНСТВА НА МНОЖЕСТВЕ СОВМЕСТНЫХ СОБЫТИЙ ДЛЯ РАСЧЕТА ВЕРОЯТНОСТЕЙ БИТОВЫХ ОШИБОК ПРИЕМА РАДИОСИГНАЛОВ С QPSK МОДУЛЯЦИЕЙ ПРИ НАЛИЧИИ ПОМЕХ

Предложен общий методологический подход к расчету вероятностей битовых ошибок приема четырехпозиционных фазоманипулированных сигналов (ФМ-4) на основе построения вероятностного пространства на множестве совместных событий приема (передачи) символов с битовыми знаками. Используются вычисленные вероятности перехода сигнальных символов. Построены графики зависимостей вероятностей от энергии бита. Проведено сравнение зависимостей вероятностей битовых ошибок без кодирования и с кодированием по Грея. Результаты исследований, рассматриваемых в статье, позволяют определять битовые ошибки при наличии структурных помех.

Ключевые слова: вероятности символьных и битовых ошибок, четырехпозиционная фазовая манипуляция, вероятностное пространство, множество совместных событий.

ВВЕДЕНИЕ

Сигналы с квадратурной фазовой манипуляцией (*quadrature phase shift keying* – QPSK) находят широкое применение в системах спутниковой связи и являются фазоманипулированными радиосигналами с числом позиций четыре, т. е. ФМ-4. Оценка помехоустойчивости таких многопозиционных сигналов осуществляется по значениям вероятностей битовых ошибок при заданных уровнях сигнала, приходящихся на один бит принимаемой информации. Расчет вероятностей битовых ошибок, особенно при наличии помех в радиоканале, в настоящее время имеет некоторые трудности. Следует отметить, что в доступной литературе отсутствует описание общего методологического подхода для расчета вероятностей битовых ошибок. В работах [1–3] используется формула для расчета средней битовой ошибки многопозиционного ФМ-сигнала на основе использования переходных вероятностей и хемминговых расстояний между позициями символов, содержащих по несколько битов каждый. Однако эта формула справедлива только для симметричного сигнального созвездия в присутствии гауссова шума и для случая отсутствия внешних структурных помех. В некоторых работах приводятся результаты вычисления вероятностей битовых ошибок, но методика их вывода не представлена [4]. Известны статьи, где в выводе формул для расчетов используются приближенные результаты [5–10], справедливые только для больших соотношений сигнал/шум и в случае без помех. Кроме того, в указанных работах не учитывается биортогональность фазоманипулированных многопозиционных сигналов, они считаются ортогональными, что приводит к неточным результатам.

Таким образом, описание метода построения вероятностного пространства на множестве совместных событий для расчета вероятностей битовых ошибок приема радиосигналов с QPSK модуляцией при наличии помех, который учитывает биортогональность фазоманипулированных многопозиционных сигналов, является актуальной задачей.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для построения вероятностного пространства на множестве совместных событий обозначим передаваемые символы как априорные события: 1-й символ (00), 2-й символ (01), 3-й символ (10), 4-й символ (11). При приеме принимаются решения о том, какой символ передавался. Обозначим принятые символы как апостериорные события: 1-й символ ($\widehat{00}$); 2-й символ ($\widehat{01}$); 3-й символ ($\widehat{10}$); 4-й символ ($\widehat{11}$).

Тогда составляющие множества совместных событий можно обозначить следующим образом:

$$\begin{aligned} &(\widehat{00}, 00); (\widehat{01}, 00); (\widehat{10}, 00); (\widehat{11}, 00); \\ &(\widehat{00}, 01); (\widehat{01}, 01); (\widehat{10}, 01); (\widehat{11}, 01); \\ &(\widehat{00}, 10); (\widehat{01}, 10); (\widehat{10}, 10); (\widehat{11}, 10); \\ &(\widehat{00}, 11); (\widehat{01}, 11); (\widehat{10}, 11); (\widehat{11}, 11). \end{aligned}$$

На первой позиции каждого события (символа) располагается информационный знак 1-го бита, соответственно, на второй позиции – информационный знак 2-го бита.

Каждому совместному событию соответствует величина своей вероятности, обозначаемой буквой P . Тогда вероятностное пространство на множестве совместных событий можно обозначить следующим образом:

$$\begin{aligned} &P(\widehat{00}, 00); P(\widehat{01}, 00); P(\widehat{10}, 00); P(\widehat{11}, 00); \\ &P(\widehat{00}, 01); P(\widehat{01}, 01); P(\widehat{10}, 01); P(\widehat{11}, 01); \\ &P(\widehat{00}, 10); P(\widehat{01}, 10); P(\widehat{10}, 10); P(\widehat{11}, 10); \\ &P(\widehat{00}, 11); P(\widehat{01}, 11); P(\widehat{10}, 11); P(\widehat{11}, 11). \end{aligned}$$

Вероятности совместных событий, как известно, вычисляются через произведения априорных и условных вероятностей, а именно:

$$\begin{aligned} P(\widehat{00}, 00) &= P(00)P(\widehat{00}/00); \\ P(\widehat{01}, 00) &= P(00)P(\widehat{01}/00); \\ P(\widehat{10}, 00) &= P(00)P(\widehat{10}/00); \\ P(\widehat{11}, 00) &= P(00)P(\widehat{11}/00). \end{aligned}$$

Необходимо определить вероятности ошибок приема 1-го и 2-го битов при наличии или отсутствии кодирования по Грею. При расчетах следует выполнить анализ изложенных методик вывода формул для вычисления условных вероятностей символов и использовать уже выведенные формулы и описанное вероятностное пространство с целью сравнения полученных вероятностей битовых ошибок сигнала с $QPSK$ модуляцией для случаев отображения по Грею [1–4] и не по Грею в канале с белым гауссовым шумом.

ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Рассмотрим отдельно методологию приема 1-го и 2-го битов. Внутри каждого бита отдельно рассмотрим прием информационных знаков 0 и 1. Обозначим $0_1, 1_1$ – знаки 0 и 1 в 1-м бите, а также $0_2, 1_2$ – знаки 0 и 1 во 2-м бите. Правильный прием знака 0_1 есть совместное событие ($\widehat{0}_1, 0_1$), правильный прием знака 1_1 есть совместное событие ($\widehat{1}_1, 1_1$). Нетрудно увидеть, что события ($\widehat{0}_1, 0_1$) и ($\widehat{1}_1, 1_1$) равны объединению следующих совместных событий:

$$\begin{aligned}(\widehat{0}_1, 0_1) &= (\widehat{00}, 00) \cup (\widehat{01}, 00) \cup (\widehat{00}, 01) \cup (\widehat{01}, 01); \\ (\widehat{1}_1, 1_1) &= (\widehat{11}, 11) \cup (\widehat{10}, 11) \cup (\widehat{10}, 10) \cup (\widehat{11}, 10).\end{aligned}$$

События (Правильный прием 1-го бита) и (Правильный прием 2-го бита) есть объединения следующих совместных событий:

$$\begin{aligned}(\text{Правильный прием 1 – го бита}) &= (\widehat{0}_1, 0_1) \cup (\widehat{1}_1, 1_1); \\ (\text{Правильный прием 2 – го бита}) &= (\widehat{0}_2, 0_2) \cup (\widehat{1}_2, 1_2).\end{aligned}$$

Тогда вероятности правильного приема 1-го и 2-го битов определяются выражениями:

$$\begin{aligned}P_{\text{прав}b1} &= P(\widehat{0}_1, 0_1) + P(\widehat{1}_1, 1_1); \\ P_{\text{прав}b2} &= P(\widehat{0}_2, 0_2) + P(\widehat{1}_2, 1_2).\end{aligned}$$

Исходя из вышеизложенного выпишем вероятности правильного приема знаков 0_1 и 1_1 :

$$\begin{aligned}P(\widehat{0}_1, 0_1) &= P(\widehat{00}, 00) + P(\widehat{01}, 00) + P(\widehat{00}, 01) + P(\widehat{01}, 01); \\ P(\widehat{1}_1, 1_1) &= P(\widehat{11}, 11) + P(\widehat{10}, 11) + P(\widehat{10}, 10) + P(\widehat{11}, 10).\end{aligned}$$

Вероятности ошибки приема значений «0» и «1» 1-го бита, соответственно, имеют вид:

$$\begin{aligned}P_{\text{ош}}(0_1) &= P(\widehat{1}_1, 0_1) = P(\widehat{10}, 00) + P(\widehat{11}, 00) + P(\widehat{10}, 01) + P(\widehat{11}, 01); \\ P_{\text{ош}}(1_1) &= P(\widehat{0}_1, 1_1) = P(\widehat{00}, 11) + P(\widehat{01}, 11) + P(\widehat{00}, 10) + P(\widehat{01}, 10).\end{aligned}$$

Вероятность ошибки приема 1-го бита определяется по формуле:

$$P_{\text{ош}b1} = P_{\text{ош}}(0_1) + P_{\text{ош}}(1_1).$$

Вероятности ошибки приема значений «0» и «1» 2-го бита, соответственно, имеют вид:

$$\begin{aligned}P_{\text{ош}}(0_2) &= P(\widehat{1}_2, 0_2) = P(\widehat{01}, 00) + P(\widehat{11}, 00) + P(\widehat{01}, 10) + P(\widehat{11}, 10); \\ P_{\text{ош}}(1_2) &= P(\widehat{0}_2, 1_2) = P(\widehat{10}, 11) + P(\widehat{00}, 11) + P(\widehat{00}, 01) + P(\widehat{10}, 01).\end{aligned}$$

Расчет вероятности ошибки приема 2-го бита выполняется по формуле

$$P_{\text{ош}b2} = P_{\text{ош}}(0_2) + P_{\text{ош}}(1_2).$$

Примем, что априорные вероятности символов одинаковы, все символы равновероятны, т. е. $P(00) = P(01) = P(10) = P(11) = 1/4$. Тогда для определения символьных и битовых вероятностей необходимо найти условные вероятности символов, используя априорные вероятности.

Обычно априорные вероятности принимаются одинаковыми, т. е. передаваемые символы равновероятны. В результате имеем

$$P(00) = P(01) = P(10) = P(11) = 1/4.$$

Вероятность ошибки приема знака «0» в 1-м бите определяется по формуле

$$P_{\text{ош}}(0_1) = P(\widehat{1}_1, 0_1) = [P(\widehat{10}/00) + P(\widehat{11}/00) + P(\widehat{10}/01) + P(\widehat{11}/01)]/4.$$

Условные вероятности находим по выведенным интегральным формулам [11, 12]:

$$P(\widehat{11}/01) = P(\widehat{10}/00) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} \int_{-x-\sqrt{2}(\sqrt{2}hb)}^{x-\sqrt{2}(\sqrt{2}hb)} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2}} dy dx.$$

$$P(\widehat{10}/01) = P(\widehat{11}/00) = \frac{1}{2\pi} \int_{\sqrt{2}(\sqrt{2}hb)}^{\infty} \int_{-x+\sqrt{2}(\sqrt{2}hb)}^{x-\sqrt{2}(\sqrt{2}hb)} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2}} dy dx.$$

Введем обозначение:

$$hb = \sqrt{E_b/N_0},$$

где E_b/N_0 – отношение сигнал/шум, приведенное к одному биту;

E_b – энергия одного бита;

N_0 – односторонняя спектральная плотность белого гауссового шума в канале.

Таким же образом находим вероятности $P_{\text{ош}}(0_1)$, $P_{\text{ош}}(1_1)$, $P_{\text{ош}}(0_2)$, $P_{\text{ош}}(1_2)$ и средние вероятности ошибок приема 1-го и 2-го битов – $P_{\text{ош}b1}$ и $P_{\text{ош}b2}$ по Грею, используя алгоритм, структура которого представлена на рис. 1.

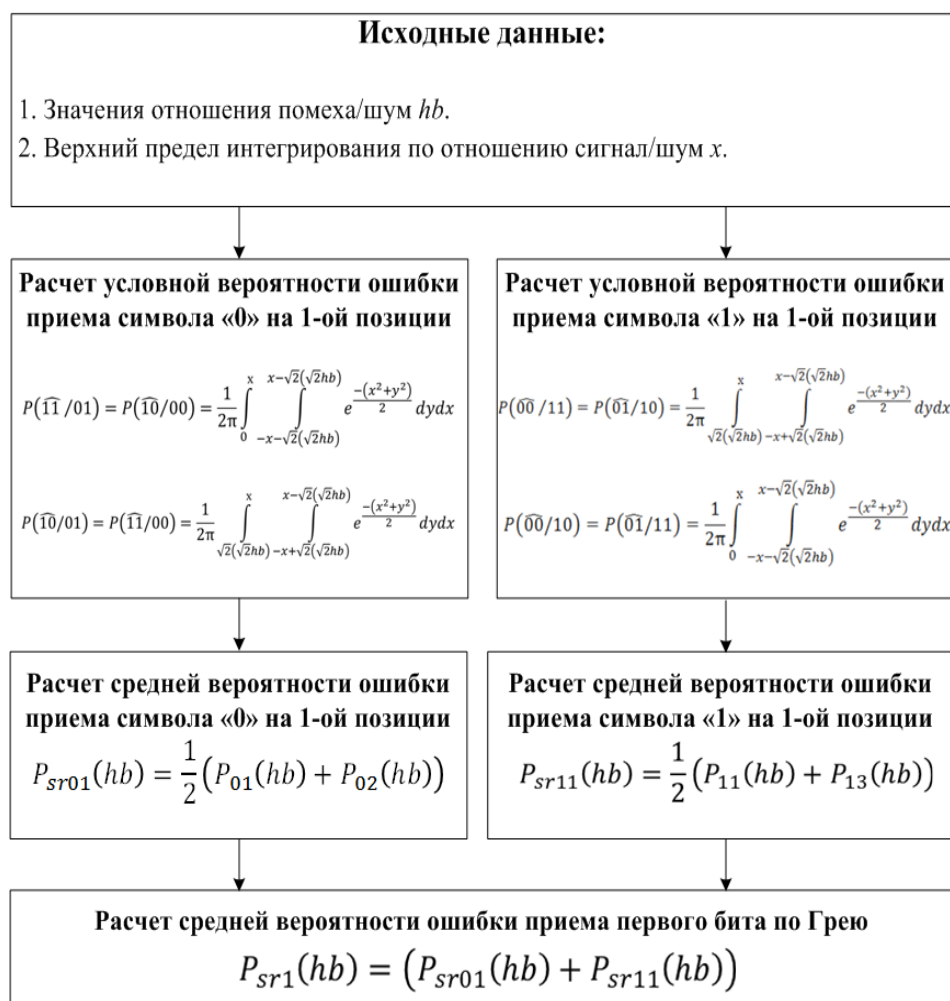


Рис. 1. Структурная схема алгоритма расчета вероятности ошибок приема 1-го бита по Грею

Анализ существующих зависимостей показывает, что величина вероятности ошибки приема 1-го бита не зависит от наличия или отсутствия отображения по Грейю, поэтому достаточно рассматривать вероятность ошибки приема только 2-го бита.

Для определения вероятностей ошибок 2-го бита не по Грейю используем выражение для расчета вероятности ошибки приема знака «0» во 2-м бите:

$$P_{\text{ош}}(0_2) = P(\widehat{1}_2, 0_2) = [P(\widehat{01}/00) + P(\widehat{11}/00) + P(\widehat{01}/10) + P(\widehat{11}/10)]/4,$$

и выражение для расчета вероятности ошибки приема знака «1» во втором бите:

$$P_{\text{ош}}(1_2) = P(\widehat{0}_2, 1_2) = [P(\widehat{10}/11) + P(\widehat{00}/11) + P(\widehat{00}/01) + P(\widehat{10}/01)]/4.$$

На 3-й позиции в созвездии располагается символ-событие (10), а на 4-й – (11). Выполняются равенства:

$$P(\widehat{01}/00) = P(\widehat{00}/01) = P(\widehat{11}/00) = P(\widehat{10}/01);$$

$$P(\widehat{01}/10) = P(\widehat{10}/11) = P(\widehat{00}/11) = P(\widehat{10}/11).$$

Тогда расчет вероятности ошибки 2-го бита не по Грейю выполняется по формуле

$$P_{\text{ош}b2} = P(\widehat{01}/00) + P(\widehat{01}/10).$$

Структурная схема расчета вероятности ошибки 2-го бита не по Грейю представлена на рис. 2.

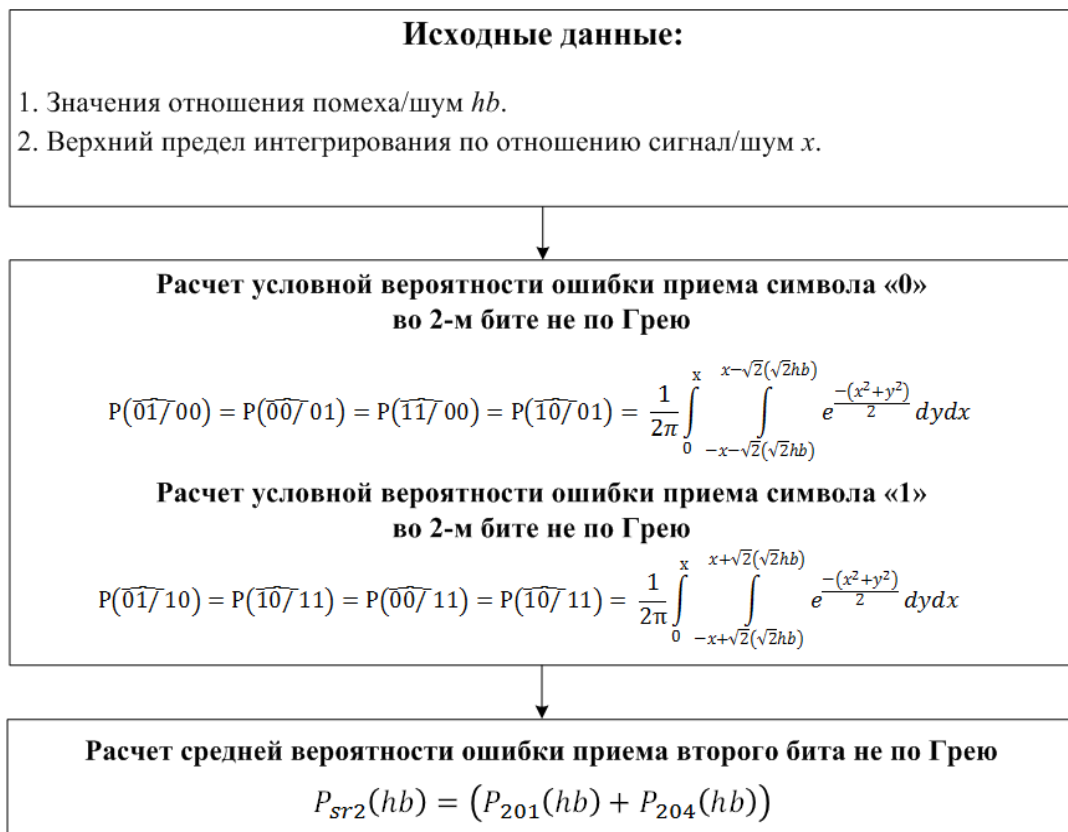


Рис. 2. Структурная схема расчета вероятности ошибки 2-го бита не по Грейю

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА ВЕРОЯТНОСТЕЙ БИТОВЫХ ОШИБОК НА ОСНОВЕ МЕТОДА ПОСТРОЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТНОГО ПРОСТРАНСТВА НА МНОЖЕСТВЕ СОВМЕСТНЫХ СОБЫТИЙ

Исследование метода построения вероятностного пространства на множестве совместных событий для расчета вероятностей битовых ошибок приема радиосигналов с *QPSK* модуляцией при наличии помех осуществлялось на основе математического моделирования в программной среде *Mathcad*.

Для определения зависимостей вероятностей ошибок 1-го и 2-го битов от отношения сигнал/шум, приведенного к одному биту, были приняты следующие ограничения и допущения:

– полученные зависимости вероятностей ошибок 1-го и 2-го битов по Грею и не по Грею сравнивались с вероятностью битовой ошибки приема сигнала с *BPSK* (двоичной ФМ-2) модуляцией;

– при расчетах использовались средние значения вероятностей ошибок 1-го и 2-го битов;

– изменение отношения сигнал/шум выполнялось с шагом, равным 0,2.

Вероятность битовой ошибки приема сигнала с *BPSK* модуляцией вычислялась по известной формуле

$$Q(hb) := \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{\sqrt{2 \cdot hb}}^{50} e^{-\frac{x^2}{2}} dx.$$

При формировании зависимостей были приняты следующие исходные данные:

– значения отношения помеха/шум определены от 0 дБ до 7 дБ;

– вероятность ошибки приема бита принята от 1 до 10^{-18} ;

– в качестве бесконечного верхнего предела интегрирования по отношению сигнал/шум принято значение 50.

Графики зависимостей вероятностей ошибок 1-го и 2-го битов по Грею представлены на рис. 3. На рис. 3 показана также зависимость вероятности ошибки приема сигнала с ФМ-2 модуляцией от отношения сигнал/шум.

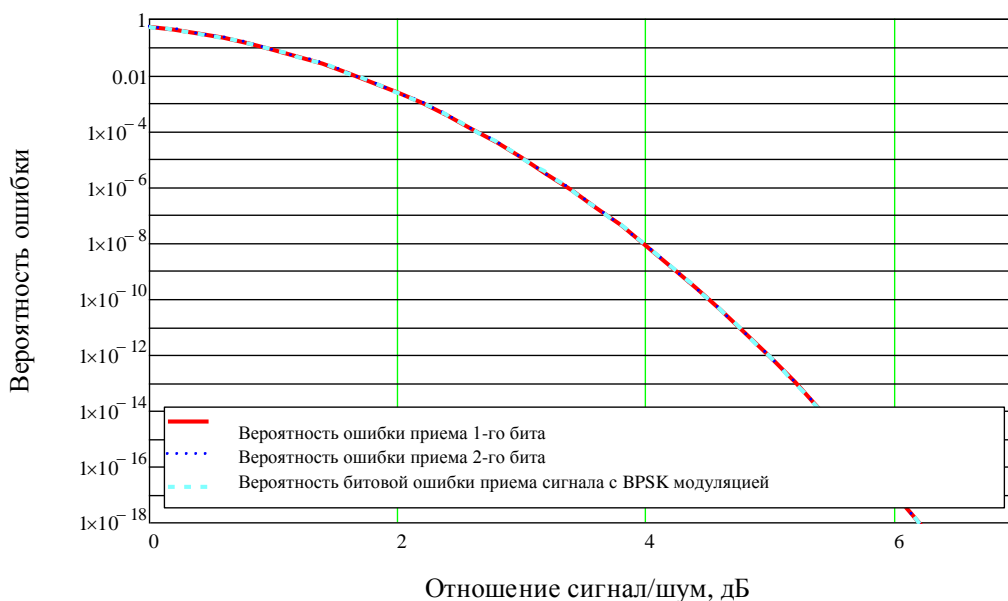


Рис. 3. Зависимости вероятностей ошибок 1-го и 2-го битов по Грею и ошибки приема сигналов ФМ-2 модуляцией от отношения сигнал/шум

Все три графика на рис. 3, как и следовало ожидать, совпадают во всех точках. Полученные результаты подтверждают проведенный выше анализ вероятности ошибки приема 1-го бита в зависимости от наличия или отсутствия отображения по Грейю.

Сравнение средних вероятностей битовых ошибок приема 2-го бита по Грейю и не по Грейю при малых отношениях сигнал/шум представлено графиками на рис. 4

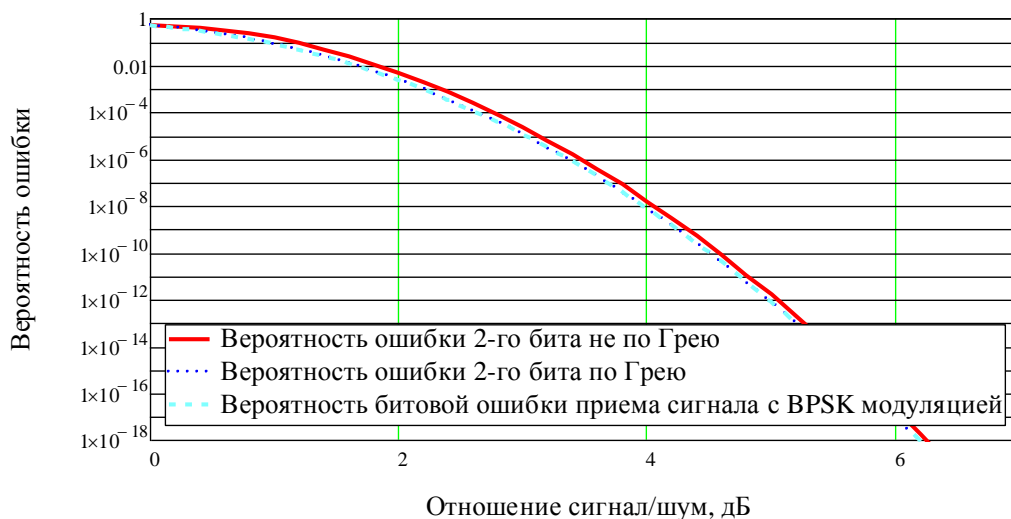


Рис. 4. Зависимости вероятностей ошибок 2-го бита по Грейю и не по Грейю при малых отношениях сигнал/шум

Значение средней вероятности ошибки 2-го бита по Грейю при отношении сигнал/шум равном 0 дБ составило 0,079, средняя вероятность ошибки 2-го бита не по Грейю при том же отношении сигнал/шум составило 0,145.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты показали, что вероятности ошибок приема 1-го и 2-го битов совершенно самостоятельны и могут иметь разные значения. Последовательности 1-го и 2-го битов образуют разные генеральные совокупности, поэтому вычисление средней вероятности по ним с математической точки зрения некорректно. Как правило, эти вероятности приводятся отдельно и самостоятельно, как представлено в работе [4].

На вероятность ошибки 1-го бита наличие или отсутствие кодирования по Грейю никак не сказывается. При использовании кодирования по Грейю вероятности ошибок 1-го и 2-го битов одинаковы во всех точках графиков. Без использования кодирования по Грейю вероятность ошибки 2-го бита больше, чем у 1-го бита.

Список используемых источников

1. Lee P. J. Computation of the bit error rate of coherent M-ary PSK with Gray code bit mapping // IEEE Transactions on Communications. – 1986. – Vol. COM-34, № 5. – P. 488–491.
2. Computation of the exact bit error rate of coherent M-ary PSK with Gray code bit mapping / J. Lassing [et al.] // IEEE Transactions on Communications. – Vol. 51, № 11. – 2003. – P. 1758–1760.
3. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение: пер. с англ. – М.: Вильямс, 2003. – 1104 с.

4. *Савищенко Н.В.* Многомерные сигнальные конструкции: их частотная эффективность и помехоустойчивость приема: моногр. / под ред. Д.Л. Бураченко. – СПб.: Политехнический ун-т, 2005. – 420 с.
5. Помехоустойчивость приема сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией в присутствии гармонической помехи / Г.В. Куликов [и др.] // *Наукоемкие технологии.* – 2018. – № 11. – С. 32–38.
6. *Куликов Г.В., Нестеров А.В., Лелюх А.А.* Помехоустойчивость приема сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией в присутствии гармонической помехи // *Журнал радиоэлектроники.* – 2018. – № 11. – URL: <http://jre.cplire.ru/jre/nov18/9/text.pdf> (дата обращения: 20.011.2020).
7. *Куликов Г.В., Нгуен Ван Зунг, До Чунг Тиен* Влияние фазоманипулированной помехи на помехоустойчивость корреляционного демодулятора сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией // *Российский технологический журнал.* – 2019. – Т. 7, № 2. – С. 18–28. – URL: https://rtj.mirea.ru/upload/medialibrary/4c2/RTZH_2_2019_18_28.pdf (дата обращения: 20.011.2020).
8. *Куликов Г.В., Нгуен Ван Зунг, До Чунг Тиен* Помехоустойчивость приема сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией в канале связи с нефлуктуационными помехами // II Международный научно-технический форум СТНО-2019: сб. тр. – Т. 1. – С. 9–13.
9. *Нгуен Ван Зунг* Помехоустойчивость корреляционного приемника сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией при наличии ретранслированной помехи // *Журнал радиоэлектроники.* – 2019. – № 3. – URL: <http://jre.cplire.ru/jre/mar19/4/text.pdf> (дата обращения: 20.011.202).
10. *Куликов Г.В., Лелюх А.А., Граченко Е.Н.* Помехоустойчивость когерентного приемника сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией при наличии ретранслированной помехи // *Радиотехника и электроника.* – 2020. – Т. 65, № 8. – С. 804–808.
11. *Звонарев В.В., Пименов В.Ф., Попов А.С.* Методика расчета помехоустойчивости приема сигнала с четырехпозиционной фазовой манипуляцией при воздействии гармонической когерентной помехи // *Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского.* – Вып. 673. – 2020. – С. 79–89.
12. *Звонарев В.В., Попов А.С.* Методика расчета потенциальной помехоустойчивости оптимального когерентного приема многопозиционного фазоманипулированного радиосигнала с белым шумом // *Радиотехника.* – 2019. – Т. 83, № 4. – С. 79–83.

И.В. Сахно,
доктор технических наук, профессор

ПОИСК И ОБНАРУЖЕНИЕ ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ ПРИ ПЕРЕХОДЕ К ОБРАБОТКЕ В НЕЛИНЕЙНОМ ВРЕМЕННОМ МАСШТАБЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВОЙСТВ ФРАКТАЛЬНЫХ ОТОБРАЖЕНИЙ

В работе рассматривается подход к организации корреляционной обработки фазоманипулированных сигналов с использованием свойств фрактальных отображений и технологии перехода к обработке сигналов в нелинейном временном масштабе. Приводятся результаты экспериментальной отработки технологии приема и обработки непрерывных фазоманипулированных сигналов в нелинейном временном масштабе.

Ключевые слова: фазоманипулированные сигналы, фрактальные отображения, пространственно-временная обработка, обнаружение сигналов, корреляционный прием, программный приемник, нелинейный временной масштаб.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее важных этапов в процессе разработки перспективных образцов радиолокационных, радионавигационных систем является этап проектирования цифровых приемных устройств, которые должны обеспечивать не только заданную чувствительность, но и высокий уровень помехоустойчивости во всех режимах функционирования. При этом наиболее важным являются режим работы приемника, когда осуществляется поиск по частоте и по задержке, и обнаружение принимаемого сигнала.

Известно, что при приеме фазоманипулированного сигнала (ФМнС) с длительностью периода T_n на этапе обнаружения приемник должен проанализировать N_τ возможных значений задержки, при N_{Fd} возможных значениях доплеровского смещения частоты, что предполагает реализацию двумерного алгоритма поиска сигнала в координатах «частота – задержка» [1, 8]. Поэтому двумерная частотно-временная область поиска с интервалами неопределенности по задержке $T_n = \Delta\tau \times N_\tau$ и частоте $F_n = \Delta f \times N_{Fd}$ условно «разбивается» на $N_\Sigma = N_\tau \times N_{Fd}$ элементарных участков (ячеек поиска), размеры которых пропорциональны значениям интервалов корреляции принимаемого сигнала по частоте Δf и по задержке $\Delta\tau$ соответственно. Это позволяет рассматривать этап поиска ФМнС как задачу последовательного анализа $N_\Sigma = F_n T_n / \Delta f \Delta\tau$ ячеек на частотно-временной плоскости [1, 8].

Например, при приеме сигнала открытого доступа GPS (C/A-кода) число элементарных участков поиска по задержке равно удвоенному числу символов псевдослучайной последовательности (ПСП) дальномерного C/A кода и составляет 2046. Число элементарных интервалов поиска по частоте равно отношению максимального доплеровского сдвига (± 15 кГц) к полосе захвата схемы частотной автоподстройки (750 Гц) и достигает 40. Соответственно, $N_\Sigma = 163680$ [1, 2]. При приеме распространенных в настоящее время навигационных сигналов с длиной дальномерного кода 10230 количество ячеек поиска составит $N_\Sigma = 818400$.

В случае наличия помех на входе приемного устройства задача становится еще более затратной с точки зрения требуемого вычислительного ресурса цифрового приемника, поскольку пропорционально энергетике помехового сигнала возрастает и время, необходимое для анализа каждой ячейки на частотно-временной плоскости, кроме того, требуется выполнение дополнительных вычислительных процедур, ориентированных на обнаружение и режекцию помех [1, 2, 8]. Отмеченные выше особенности приема ФМнС могут существенно

влиять на увеличение времени вхождения в синхронизм с принимаемым сигналом и способствовать снижению эффективности работы приемника по целому ряду показателей.

Таким образом, для радиолокационных и радионавигационных систем с фазоманипулированными сигналами по-прежнему является актуальным обеспечение ускоренного поиска и обнаружения сигнала (с заданными вероятностными характеристиками), в особенности в условиях воздействия преднамеренных помех различной структуры, поскольку в режиме поиска и обнаружения ФМнС приемное устройство наиболее уязвимо по отношению к преднамеренным помехам [1, 8]. Поэтому в дальнейшем будет рассмотрен один из возможных подходов повышения качества приема ФМнС (в том числе при наличии помех), достигаемого за счет перехода к обработке в нелинейной шкале времени или в нелинейном временном масштабе [7].

ОБРАБОТКА ФМнС В ЛИНЕЙНОМ ВРЕМЕННОМ МАСШТАБЕ (ЛВМ) – КЛАССИЧЕСКИЙ ПОДХОД

При классическом подходе [1, 8] принимаемый непрерывный ФМнС на входе цифрового приемника подвергается дискретизации с частотой $f_D = 1/\delta_K$. Такой же дискретизации подвергается и опорный сигнал (рис. 1).

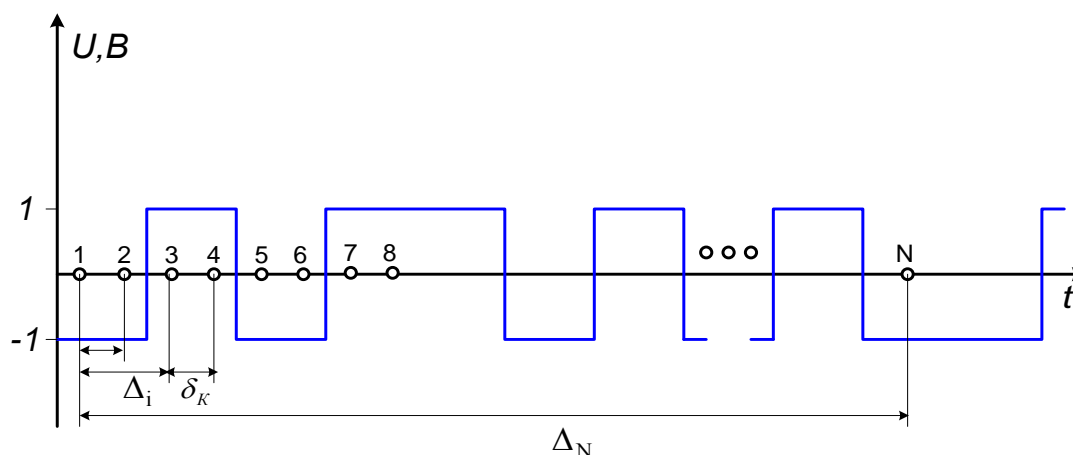


Рис. 1. Дискретизация опорной ПСП по времени при использовании линейного временного масштаба

На рис. 2 (для примера) представлен результат вычисления корреляционной функции сигнала L1 GPS открытого доступа на выходе приемного устройства корреляционного типа. Результат, показанный на рис. 2, получен при использовании когерентного накопления на интервале, равном периоду кода (далее по тексту – короткий временной интервал) $T_n = 1$ мс с последующим некогерентным накоплением результатов на интервале ≈ 0.5 с.

Известно из литературы [1, 2, 8], что шкала времени при дискретизации по Котельникову является линейной и регулярной, поэтому шаг по времени в указанной шкале $\delta_K = \delta_{i-1} = \delta_i = \text{const}$ (рис. 1) – это постоянная величина, которая определяется шириной спектра принимаемого сигнала.

Иными словами, классический подход предполагает выполнение в корреляционном приемнике поиска принимаемого сигнала и решение задачи обнаружения в линейном временном масштабе, т. е. при равномерном распределении отсчетов сигнала вдоль временной оси (рис. 1).

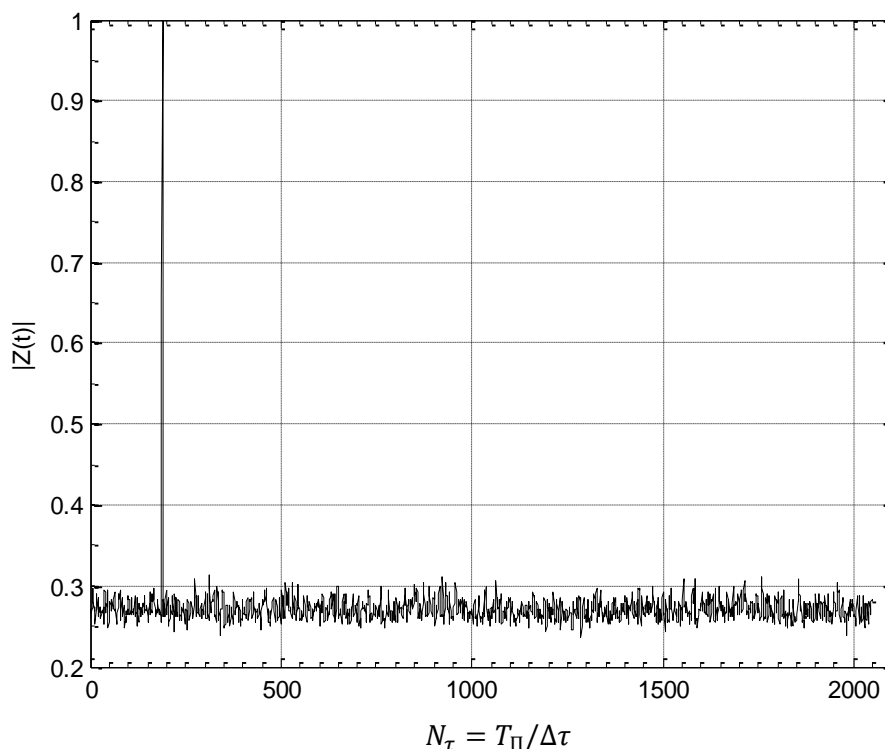


Рис. 2. Результат вычисления ВКФ на периоде кода ФМнС $T_n = 1$ мс и некогерентное накопление результата на интервале ≈ 0.5 с (сигнал навигационного КА №16 GPS L1, при значении частоты Доплера $F_D = 188$ Гц)

ОБРАБОТКА ФМнС В НЕЛИНЕЙНОМ ВРЕМЕННОМ МАСШТАБЕ (НВМ). ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ВРЕМЕННОГО МАСШТАБА В ПРИЕМНОМ ТРАКТЕ

С целью перехода к обработке в НВМ в приемном тракте корреляционного приемника ФМнС введем новую нелинейную шкалу времени \tilde{t}_i , $i = 0 \dots \tilde{N}_{\max}$, связанную с исходной линейной шкалой времени, например, с преобразованием растяжения вида [5–7]

$$\tilde{t}_i = t_0 + \tilde{t}_{i-1} \tilde{\delta}_i, \quad i = 0 \dots \tilde{N}_{\max}, \quad (1)$$

где $\tilde{\delta}_i$ – шаг нелинейной шкалы;

t_0 – начальный момент для отсчета времени в исходной временной шкале

\tilde{N}_{\max} – максимальное количество временных отсчетов в выходной выборке сигнала (размерность сигнала в НВМ).

На вновь введенной нелинейной временной шкале \tilde{t}_i подвергнем дискретизации принимаемый и опорный сигналы. Технология нелинейной дискретизации показана на рис. 3. Таким образом, далее предполагается, что в НВМ дискретизация и принимаемого, и опорного сигналов осуществляется с переменным шагом во времени, начиная с некоторого заданного момента времени t_0 .

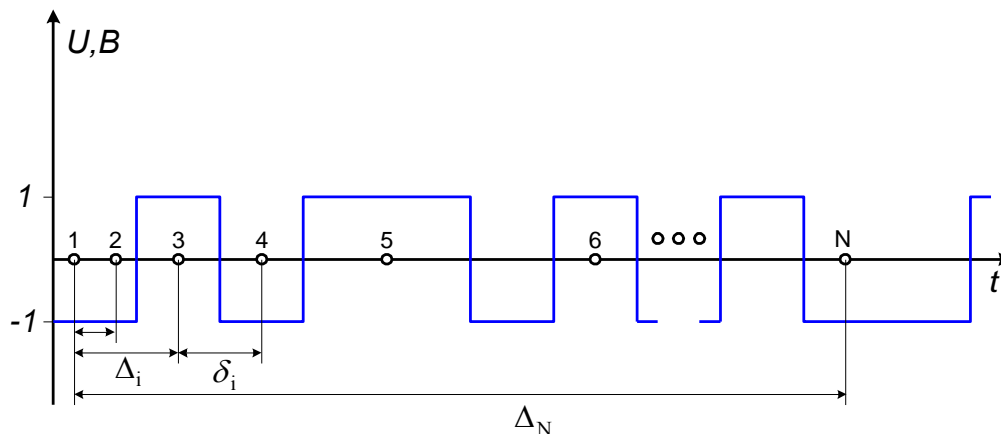


Рис. 3. Дискретизация ПСП с нелинейным шагом (иллюстрация для пояснения принципа перехода к НВМ)

Величина \tilde{N}_{\max} (рис. 3) для принимаемого сигнала, как правило, ограничена длительностью записанной реализации T_C (длительностью реализации входного сигнала) или общим числом N_{Σ} доступных для обработки отсчетов сигнала. Тогда количество получаемых отсчетов сигнала после перехода к НВМ (чаще всего) $\tilde{N}_{\max} \leq N_{\Sigma}$ и $T_{\max} \leq T_C$, где T_{\max} – длительность интервала нелинейного преобразования временного масштаба.

Для опорного сигнала при корреляционном приеме с использованием технологии нелинейной временной дискретизации также должно быть сформировано (в той же последовательности) строго определенное количество отсчетов, соответствующее размерности окна анализа \tilde{N}_{\max} . Однако интервал их выбора всегда ограничен длительностью периода опорной кодовой последовательности $T_{\text{П}}$, а шаг и последовательность выбора определяются заданным правилом отображения при переходе к обработке в НВМ.

Для удобства дальнейшего рассмотрения введем преобразование R , отображающее исходную j -ю кодовую последовательность Λ_j , где $j = 1 \dots N_{\text{КП}}$ $\lambda_j \in \Lambda, j = 1, \dots, N_{\text{КП}}$, в выходную кодовую последовательность $\tilde{\Lambda}_j$ $\tilde{\lambda}_j \in \tilde{\Lambda}, j = 1, \dots, N_{\text{КП}}$ в НВМ на временном интервале T_C :

$\Lambda_j \xrightarrow[T]{R} \tilde{\Lambda}_j$ где $j = 1 \dots N_{\text{КП}}$ или $R: \Lambda \rightarrow \tilde{\Lambda}$, (здесь $N_{\text{КП}}$ – размерность ансамбля кодов, используемых в радионавигационной или радиолокационной системе при формировании ФМнС; T – символ, который подчеркивает отображение на временном интервале; $\Lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{N_{\text{КП}}}\}$, $\tilde{\Lambda} = \{\tilde{\lambda}_1, \tilde{\lambda}_2, \dots, \tilde{\lambda}_{N_{\text{КП}}}\}$ – соответствующие ансамбли кодов).

Сама процедура нелинейной дискретизации во времени принимаемого сигнала R , показанная на рис. 3, может быть реализована, например путем записи отсчетов во входной регистр и последующей нелинейной выборки из памяти набора из \tilde{N}_{\max} отсчетов (в соответствии с определенным правилом вычисления адреса, или правилом отображения).

Количество отсчетов принимаемого сигнала и количество отсчетов опорного сигнала, подвергаемых нелинейной выборке, при этом равны соответственно N_{OS} и N_{Σ} , причем (как правило) $N_{OS} = N_{\Sigma}$ для осуществления корреляционного приема.

Для перехода к обработке ФМнС в НВМ номер отсчета \tilde{n}_i сигнальной реализации и номер соответствующего ему отсчета опорного сигнала \tilde{n}_{OSi} (при чтении из памяти) вычисляются с использованием выражений:

$$\tilde{n}_i = (n_0 \cdot \tilde{\delta}_{int}^{i-1}) \bmod N_{\Sigma}, i = 1 \dots \tilde{N}_{\max}, \quad (2)$$

$$\tilde{n}_{OSi} = (n_0 \cdot \tilde{\delta}_{int}^{i-1}) \bmod N_{OS}, i = 1 \dots \tilde{N}_{\max}, \quad (3)$$

где $\tilde{\delta}_{\text{int}}$ – шаг изменения текущего номера отсчета реализации сигнала (при чтении отсчетов из памяти) при переходе в НВМ;

n_0 – номер начального отсчета (определяющего начальную фазу кода в НВМ) опорного и принимаемого сигнала, соответствующего заданному моменту времени t_0 и считываемого из памяти первым.

Далее более подробно рассмотрим алгоритм перехода к НВМ, формирующий на выходе преобразования по сути новую ПСП (или ФМНС) из исходной, который определен на конечном замкнутом интервале $[1, N_{OS}]$ или $[1, N_{\Sigma}]$ с «отражающими границами» (2) и (3), вследствие ограниченности количества символов (размера выборки) в исходной последовательности принимаемого и опорного сигналов.

Очевидно, что при нелинейном преобразовании временного масштаба для принимаемого (2) и опорного (3) сигналов на входе корреляционного приемника изменяется порядок следования отсчетов, и, как следствие, изменяется структура опорной и принимаемой кодовой последовательности, изменяются частотно-временные характеристики и помех, действующих в канале приема, а также корреляционные свойства взаимодействующих сигналов [5–7].

Особенность предлагаемого подхода заключается в том, что при указанном перемещении отсчетов на входе приемника удается сохранить корреляционные свойства ФМНС и «разрушить» временную структуру помехового сигнала [5,7].

Выполнение операций, подобных (3) и (2), далее будем называть отображением R (или фрактальным отображением [5,7]) принимаемого сигнала и опорной кодовой последовательности в нелинейный временной масштаб (НВМ).

Отображение R по своей сути эквивалентно нелинейной передискретизации или перемещению сигнала и переходу к НВМ. Для каждой принимаемой кодовой последовательности ансамбля в составе ФМНС произведем переход к НВМ в соответствии с правилами (2) и (3). Например, количество кодовых последовательностей в ансамбле $N_{\text{КП}}$ для открытых сигналов $L1$ GPS $N_{\text{КП}}=1\div 37$, а для сигналов ГЛОНАСС – $N_{\text{КП}}=1$.

В работе [5, 7] показано, что возможно использование для преобразования (отображения) R временного масштаба исходного сигнала одномерного варианта фрактального отображения Жюлиа JID [3], а равенства (2) и (3) с учетом выражения для JID может быть преобразовано к виду:

$$n_{m+1} = (mn_m^2 + n_0) \bmod N_{OS}, \text{ где } m = 0, 1, 2 \div N_{OS} - 1, \quad (4)$$

$$n_{m+1} = (n_0 \delta^m + n_0 m) \bmod N_{OS}, \text{ где } m = 0, 1, 2 \div N_{OS} - 1, \quad (5)$$

где δ – параметр отображения, или величина, характеризующая шаг изменения текущего номера отсчета сигнала (при отображении);

n_0 – номер отсчета исходной кодовой последовательности, с которого начинается выборка из памяти (параметр начальной инициализации отображения).

Выражения (4) и (5) определяют так называемую *траекторию отображения*, под которой следует понимать закон изменения порядкового номера отсчета входной псевдослучайной последовательности на выходе устройства отображения.

В зависимости от выбора параметра начальной инициализации отображения n_0 , параметра отображения δ и характеристик самого исходного кодового набора (ансамбля) Λ , может быть реализована та или иная траектория отображения. В качестве критерия, характеризующего непересекаемость [3, 7] *траекторий отображения*, можно рассматривать результаты анализа ортогональности выходных кодовых последовательностей Λ после перехода к НВМ.

Очевидно, что использование выражениями (4) и (5) исходной кодовой последовательности ансамбля приведет к увеличению размерности поиска результирующего сигнала, если положить неизвестными значениями n_0 и δ . Тогда вычисление значения корреляционного интеграла при переходе к НВМ становится функцией уже как минимум четырех параметров $Z(\hat{t}, \hat{f}_d, n_0, \delta)$, что свидетельствует о более высокой структурной скрытности таких сиг-

налов вследствие увеличения размерности поиска сигналов в НВМ и делает невозможным их прием без знания параметров отображения [5–7].

В ходе математического моделирования процесса отображения ФМНС и его обработки в НВМ установлено следующее:

1. Изменение параметра начальной инициализации отображения n_0 правила отображения приводит к формированию новой кодовой последовательности, ортогональной исходной [5].

2. В соответствии с правилом отображения (4) и (5) может быть синтезировано $N \gg N_{OS}$ новых наборов кодовых последовательностей, подобных исходному, за счет соответствующего изменения параметров преобразования (траектории отображения) временного масштаба n_0 , δ или показателя степени при n_m в выражении (4) и (5) [5, 6].

3. Синтезированные в соответствии с правилом отображения кодовые последовательности также являются псевдослучайными последовательностями, как и порождающие их коды исходного кодового набора Λ [5].

Для более полного представления о корреляционных свойствах синтезированного сигнала при переходе к НВМ были получены численными методами и проанализированы функции неопределенности (ФН) $Z(\tau, F_D)$ сигналов после преобразования (4) и (5) в координатах «время – частота» [7].

На рис. 4 для примера приведен внешний вид ФН кода Голда и ее сечения линиями равного уровня (начиная с уровня 0,08) в НВМ, при использовании модифицированного отображения JID .

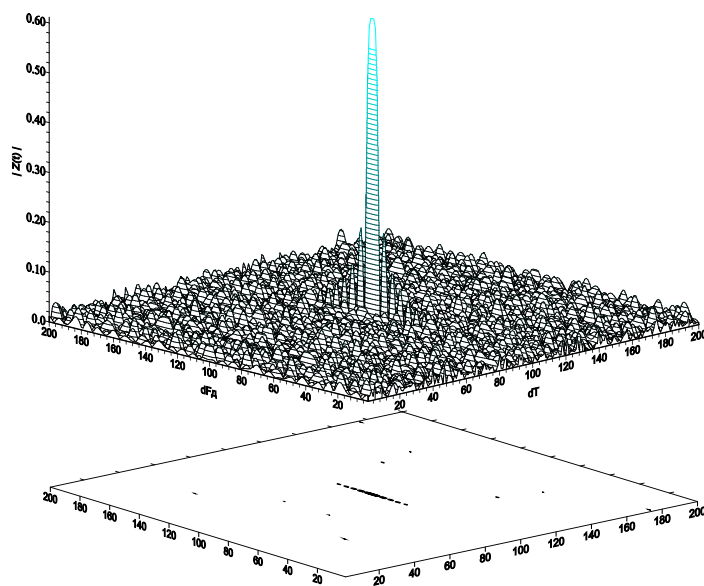


Рис. 4. Вид ФН и ее сечения линиями равного уровня (начиная с уровня 0,08) для кода Голда после перехода в НВМ, при использовании модифицированного отображения JID (4) и (5)

Анализ результатов моделирования полученных ФН ФМНС для известных ансамблей после перехода в НВМ и их сечений по осям для различных значений n_0 позволил сделать вывод о том, что, подбирая параметры отображения, можно обеспечить требуемые корреляционные свойства выходных последовательностей уже после перехода к НВМ [5–7].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ПРОВЕРКИ МЕТОДА ПРИЕМА ФМнС ПРИ ПЕРЕХОДЕ К ОБРАБОТКЕ В НВМ

В интересах практической отработки предлагаемого в работе метода приема ФМнС при переходе к НВМ был проведен эксперимент с использованием реальных непрерывных периодических ФМнС с шириной полосы ~ 1 МГц. Обработывалась (при различных параметрах настройки блоков отображения) одна и та же выборка отсчетов реального принимаемого сигнала длительностью 2 мс, с ФМнС с базой $B_{ВХ} \approx 1000$. Уровень принимаемого сигнала на входе приемного тракта установки был ниже на ≈ 20 дБ уровня собственных шумов на входе приемника.

В ходе проведения эксперимента анализировались спектральные характеристики сигналов и отношение сигнал/шум на выходе корреляционного приемника.

Структурная схема корреляционного приемника, реализующего когерентное на периоде и некогерентное межпериодное накопление сигнала в НВМ (блок 7), изображена на рис. 5. Следует отметить, что перед цифровой обработкой в ходе эксперимента осуществлялось двойное гетеродинирование принимаемого сигнала, дальнейшая обработка проводилась в квадратурах на «нулевой» частоте при различных значениях параметра инициализации преобразования – n_0 .

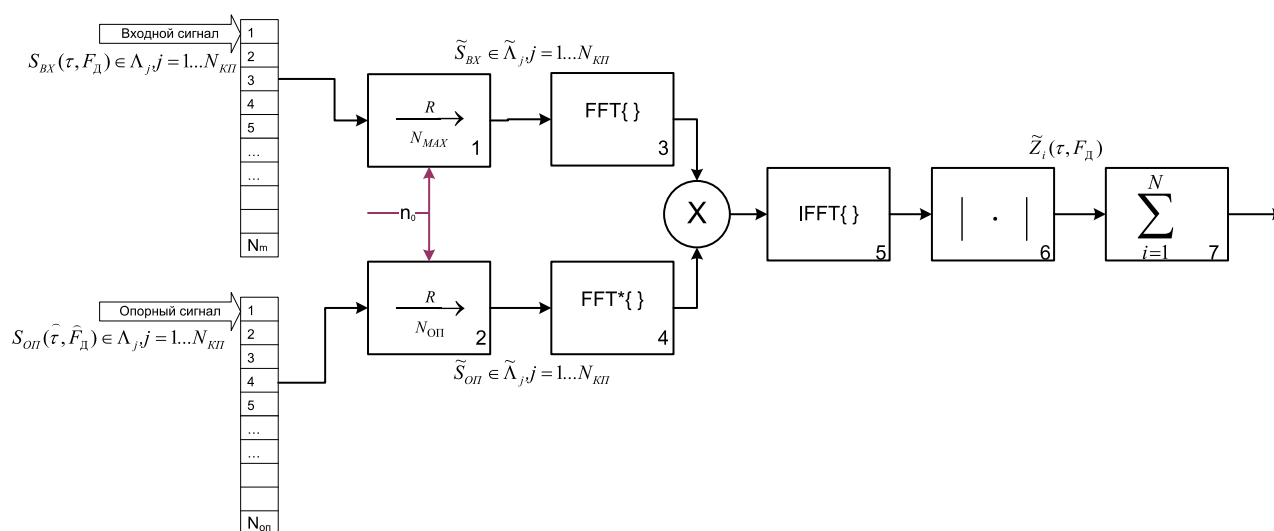


Рис. 5. Структурная схема корреляционного приемного устройства при переходе к НВМ, обрабатывающего сигналы в частотной области.

Переход в НВМ осуществляется в блоках отображения 1 и 2 (рис. 5) [5, 7], в каналах принимаемого и опорного сигналов соответственно.

На рис. 6 представлены нормированные спектры смеси сигнала с шумом на входе приемного устройства (исходный спектр) (рис. 5) и спектр на выходе устройства отображения [после перехода в НВМ в соответствии с выражением (4), блок 1 на рис. 5].

Наличие гармонических составляющих в исходном спектре (рис. 6) объясняется наличием паразитных шумов гетеродинов приемного тракта экспериментальной установки и оказывает влияние на качество приема сигнала.

В ходе анализа результатов установлено, что при определенных значениях n_0 превышающих 1000 траектория отображения [5–8] приобретает выраженный псевдослучайный характер и происходит «нормализация» спектра (выбеливание) [1] на выходе устройства отображения, а также подавление паразитных гармоник в спектре (рис. 6).

На рис. 7 представлены результаты межпериодного накопления сигнала на выходе корреляционного приемника (блок 7 на рис. 5), косвенно характеризующие качество решения задачи обнаружения ФМНС.

На рис. 7 показана динамика изменения отношения сигнал/шум при осуществлении межпериодного некогерентного накопления ФМНС на интервале от 500 до 800 мс. Осуществлялась обработка выборки длительностью 2 мс.

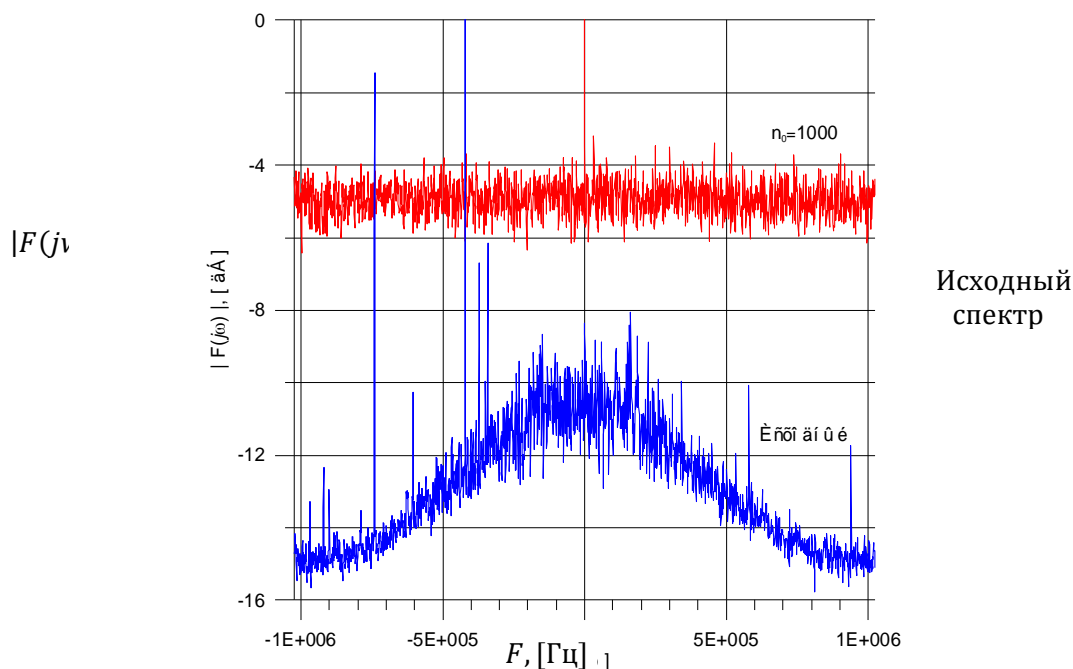


Рис. 6. Нормированные спектры смеси сигнала с шумом на входе приемного устройства (исходный спектр) и спектр на выходе устройства отображения (после перехода в НВМ)

Эксперимент показал работоспособность рассматриваемого в публикации метода обработки ФМНС в НВМ при значении n_0 , превышающем значения 750–1000, когда наблюдается прирост отношения сигнал/шум на выходе приемника относительно исходной кривой (полученной в результате обработки ФМНС по классической корреляционной схеме в линейном временном масштабе).

Значение $n_0 = 750$ можно считать пороговым, при котором начинают сказываться преимущества метода обработки в НВМ. При значениях $n_0 > 1000$ дальнейшего прироста значений отношения сигнал/шум при накоплении не наблюдается.

Прирост значения отношения сигнал/шум относительно кривой, полученной при обработке по классической схеме (исходная зависимость получена в линейном временном масштабе, рис. 7), составил более 20 дБ. Указанный прирост значения отношения сигнал/шум может трактоваться как улучшение чувствительности приемника на указанную величину вследствие «выбеления» шума на входе приемного устройства (см. рис. 5) после перехода к НВМ и подавления паразитных гармонических составляющих, наблюдаемых в исходном спектре.

Таким образом, выявленный запас по чувствительности используемого в эксперименте приемника ФМНС обусловлен также подавлением внутренних шумов и полигармонических помех тракта (см. рис. 6) при нелинейной временной обработке, уровень отдельных гармоник которых изначально превышал 12 дБ.

Следует отметить, что выявленный прирост в значениях сигнал/шум на выходе корреляционного приемника достигается за счет ощутимого усложнения схемы приемника (введение

в его состав двух блоков отображения в НВМ, реализующих перемежение отсчетов входного и опорного сигналов в соответствии с выражениями (4) и (5) и двух буферных регистров для входного и опорного сигналов (см. рис. 5).

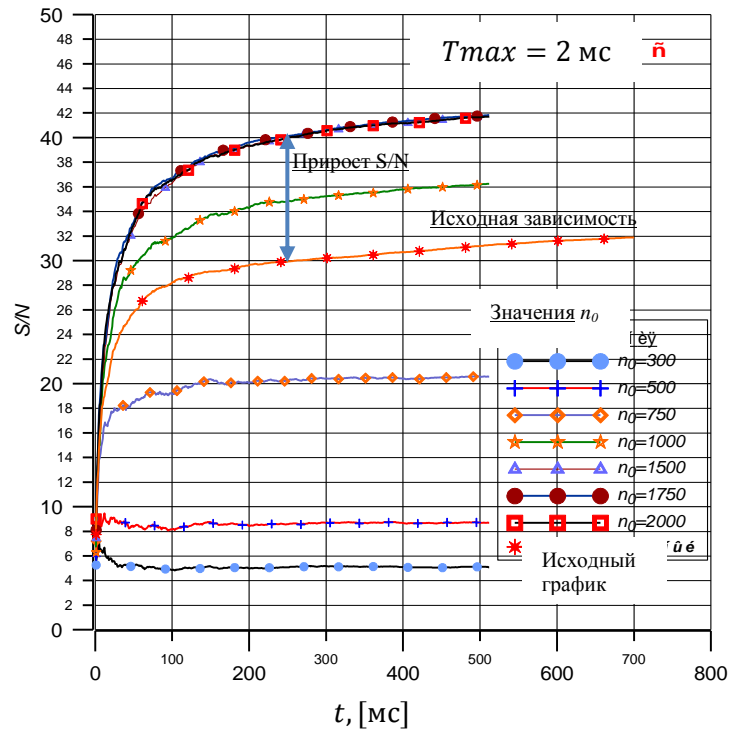


Рис. 7. Динамика изменения отношения сигнал/шум на выходе корреляционного приемника (рис. 5) при межпериодном некогерентном накоплении на интервале от 500 до 800 мс. Длительность обрабатываемой выборки 2 мс

Прирост значения сигнал/шум в НВМ (показан стрелками на рис. 7) свидетельствует о достигаемом при переходе к НВМ энергетическом преимуществе и характеризует не только потери в тракте при использовании классической схемы приема (относительно исходной зависимости), но и косвенно определяет прирост достоверности решения задачи обнаружения при приеме ФМНС при прочих равных условиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье описан подход к обработке ФМНС в НВМ и приведены отдельные экспериментальные результаты, подтверждающие «работоспособность» предлагаемого метода.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что переход к обработке ФМНС в НВМ, основанный на использовании свойств фрактальных отображений типа JID , открывает перед разработчиками целый ряд новых возможностей для существенного повышения эффективности применения перспективных образцов радиолокационных, радионавигационных систем и средств и будет способствовать улучшению и приближению к потенциальным значениям следующих ключевых ТТХ систем:

- чувствительности и дальности действия систем;
- помехоустойчивости;
- точностных характеристик каналов траекторных измерений;
- структурной скрытности используемых сигналов.

Обработка сигналов в НВМ вместе с тем технически реализуема, но потребует определенного усложнения аппаратуры приемного тракта.

Список используемых источников

1. Основы радионавигационных измерений / В.А. Губин [и др.]. – Л.: МО СССР, 1987. – 429 с.
2. Программный приемник ГЛОНАСС/GPS/Galileo на нейропроцессоре Л1879ВМ1 / В.С. Бахолдин [и др.] // Материалы Всероссийской конференции «Фундаментальное и прикладное координатно-временное обеспечение» (КВО-2005). Санкт-Петербург, 11–15 апр. – 2005. – С. 168–170.
3. *Морозов А.Д.* Введение в теорию фракталов. – М.-Ижевск: Ин-т компьютерных исследований, 2004. – 160 с.
4. *Потапов А.А.* Фракталы в радиофизике и радиолокации: Топология выборки. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Университетская книга, 2005. – 848 с.
5. Пат. 2359411 РФ, МПК Н04В015/00. Способ помехоустойчивого приема фазоманипулированных сигналов / И.В. Сахно, А.Б. Симонов, Е.А. Ткачев. – № 200105023/09; заявл. 05.02.2007; опубл. 20.06.2009; Бюл. № 17. – 8 с.
6. Пат. 2359405 РФ, МПК Н04В 1/00. Способ формирования наборов ортогональных псевдослучайных последовательностей с использованием свойств фрактальных отображений / И.В. Сахно, А.Б. Симонов, Е.А. Ткачев. – № 2006143688/09; заявл. 05.12.06.; опубл. 20.06.2009; Бюл. № 17. – 10 с.
7. *Козлов А.В., Миклин Д.В., Сахно И.В.* Обработка сложных радионавигационных и радиолокационных сигналов в нелинейном временном масштабе с использованием свойств фрактальных отображений // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 655. – С. 45–55.
8. ГЛОНАСС. Модернизация и перспективы развития: моногр. / под ред. А.И. Перова. – М.: Радиотехника, 2020. – 1072 с.

В.Ф. Алексеев,
доктор технических наук, профессор;
Д.Д. Колесников,
кандидат технических наук;
Д.О. Медяников,
кандидат технических наук

МЕТОДИКА ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ВЗЛЕТНО-ПОСАДОЧНОЙ ПОЛОСЫ АЭРОДРОМА ГОСУДАРСТВЕННОЙ АВИАЦИИ

В статье представлена методика геодезического обеспечения взлетно-посадочной полосы аэродрома государственной авиации с использованием современных геодезических средств измерений. Выполненные экспериментальные измерения показали, что современные средства измерений обеспечивают требуемую точность определения геодезических данных на взлетно-посадочной полосе (ВПП).

Ключевые слова: аэродром, геодезическое обеспечение, взлетно-посадочная полоса.

ВВЕДЕНИЕ

Традиционно для решения задач геодезического обеспечения аэродромов государственной авиации использовались классические методы выполнения геодезических работ. При их реализации опорная геодезическая сеть аэродрома (ОГСА) создавалась методами триангуляции, полигонометрии, трилатерации. Координаты и высоты элементов ВПП определялись по результатам математической обработки полигонометрических и нивелирных ходов.

В настоящее время, в связи с созданием современной спутниковой геодезической аппаратуры, появилась возможность существенно повысить оперативность выполнения задач геодезической подготовки элементов ВПП. При этом обеспечивается требуемая точность. Особенно широкое применение в геодезической практике получила геодезическая спутниковая аппаратура, работающая в режиме реального времени (real time kinematic – RTK).

Порядок выполнения геодезических работ на аэродромах государственной авиации изложен в руководящих документах [1–5]. Одной из актуальных задач геодезического обеспечения аэродромов является определение координат, высот и азимутов элементов ВПП, так как ее качество влияет на безопасность полетов воздушных судов.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ НА ВЗЛЕТНО-ПОСАДОЧНОЙ ПОЛОСЕ АЭРОДРОМА

Под геодезическим обеспечением ВПП понимают комплекс мероприятий по определению координат, высот и азимутов ВПП, которые используются для предполетной подготовки воздушных судов[6].

На рис. 1 показаны элементы ВПП, подлежащие геодезической привязке:

- контрольная точка аэродрома (КТА);
- пороги ВПП;
- торцы ВПП;
- ось ВПП.

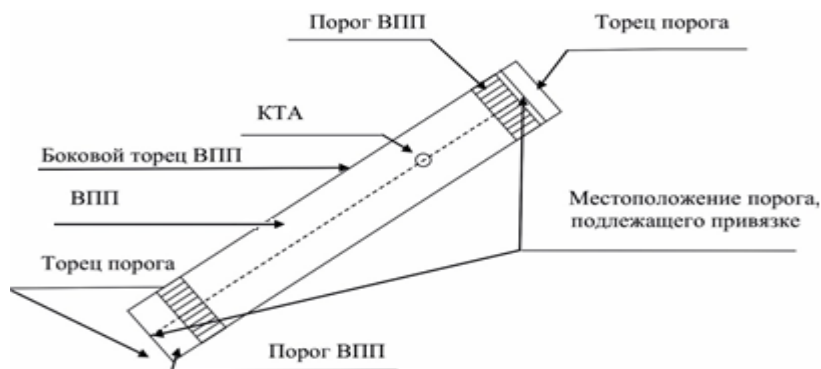


Рис. 1. Схема элементов ВПП

Согласно требованиям руководящих документов [1–5] на ВПП должны быть построены профиль и полоса, свободная от препятствий. Размеры полосы, свободной от препятствий (длина, ширина), взятые из аэронавигационного паспорта аэродрома, необходимо проверить на местности. В случае наличия препятствий на указанной полосе ее размеры указываются до первого неподвижного препятствия от порога ВПП (если эти размеры меньше объявленных).

Основой для геодезической привязки всех элементов аэродрома, в том числе и ВПП, является опорная геодезическая сеть аэродрома (ОГСА), которая должна состоять из пяти геодезических пунктов. Определение координат и высот пунктов ОГСА выполняется с использованием спутниковых методов космической геодезии [6].

Для определения координат, высот и азимутов элементов ВПП целесообразно использовать референсные станции (РС), которые следует устанавливать на пунктах ОГСА. Повышение оперативности геодезического обеспечения элементов ВПП достигается выполнением измерений в режиме реального времени (RTK – realtimekinematic). В режиме RTKРС передает дифференциальные поправки на КТА (как разности истинных и измеренных координат РС) потребителю, который уточняет по ним координаты определяемых пунктов.

Полевым работам по определению геодезических данных на ВПП аэродрома должна предшествовать подготовка, которая заключается в следующем [7]:

- инструментальном контроле взаимной согласованности пунктов ОГСА и КТА в плане и по высоте (контрольные определения пунктов опорной геодезической основы);
- планировании наблюдений за геометрическим фактором спутниковой засечки, подготовкой спутниковых приемников к выполнению измерений;
- проверке и юстировке уровней и оптических центриров геодезических приборов.

Для исключения ошибок в определении высот точек в процессе выполнения измерений необходимо в начале и в конце наблюдений выполнить контрольное измерение высоты антенны приемника на вехе.

Для контроля точности и достоверности передаваемой базовой станцией корректирующей информации подвижный спутниковый геодезический приемник в режиме RTK периодически должен устанавливаться на ближайший пункт ОГСА или КТА. После получения приемником фиксированного решения значения координат и высот, индицируемых на экране контроллера, сравниваются со значениями из каталога. Производится запись в полевой журнал расхождений между их значениями, и выполняется анализ точности определения координат и высот в реальном времени.

При переходе от одной съемочной точки к другой необходимо избегать потерь связи. При потере связи со спутниками или базовой станцией необходимо выполнить инициализацию, в соответствии с эксплуатационной документацией применяемого приемника.

Начинать измерения высот оси ВПП в режиме RTK необходимо с торца порога. Последней точкой является противоположный торец порога.

Определение высот точек оси ВПП должно быть выполнено в режиме RTK с шагом съемки 5 м для аэродромов с грунтовым покрытием и с шагом 100 м для аэродромов с искусственным покрытием.

При определении геодезических данных на ВПП необходимо выполнить следующие действия:

1. Провести развертывание аппаратуры, входящей в комплект РС, и подвижного приемника так, как это рекомендовано эксплуатационной документацией для режима RTK, измерить высоты антенн, записать значения высот в полевой журнал.

2. Подготовить РС к работе:

- установить антенну РС над центром пункта ОГСА, и отгоризонтировать ее;
- установить соединение с полевым контроллером;
- установить режим регистрации данных наблюдений спутников;
- пользуясь клавиатурой контроллера, ввести в запоминающее устройство значение высоты антенны;
- установить режим передачи корректирующей информации для режима RTK.

3. Подготовить подвижный приемник к работе в соответствии с эксплуатационной документацией:

- измерить значение высоты антенны приемника на вехе, записать в журнал;
- установить режим RTK;
- установить режим регистрации данных наблюдений спутников;
- пользуясь клавиатурой контроллера, ввести в запоминающее устройство значение высоты антенны;
- выполнить инициализацию, как описано в эксплуатационной документации, применяемого приемника, включить режим регистрации данных наблюдения спутников;
- выполнить проверку качества принимаемой корректирующей информации на ближайшем пункте ОГСА или контрольной точке;
- установить приемник на съемочный пикет;
- пользуясь клавиатурой контроллера, ввести в запоминающее устройство номер пикета, значение высоты антенны и необходимую семантическую информацию;
- выполнить регистрацию данных наблюдения спутников в течение времени, необходимого для получения фиксированного решения из 5 эпох на определяемой точке;
- повторить аналогичную регистрацию данных наблюдения спутников на всех точках съемки;
- выполнить контрольное измерение высоты антенны приемника на вехе, записать в журнал ее значение и время;
- после завершения съемки выполнить проверку качества принимаемой корректирующей информации на ближайшем пункте ОГСА или КТА.

4. Выключить приемники. Выполнить свертывание спутниковой аппаратуры.

Применение представленной методики, с одной стороны, повышает оперативность выполнения практически всех видов геодезических работ, с другой – соответствует требованиям к точности определения геодезических данных.

Особое внимание при выполнении измерений в представленной методике уделяется правильной настройке спутниковой аппаратуры и постоянному контролю качества принимаемой информации от МС РС.

При отсутствии радиосигнала, передаваемого модемом РС (удаление на большое расстояние, влияние помех), необходимо принять решение о прекращении съемки и перестановке РС на другой ближайший пункт ОГСА.

При расхождениях значений координат и высот, превышающих допуск, и отсутствии внешних повреждений марки центра целесообразно выполнить новые измерения координат и высот центров пунктов ОГСА.

По результатам съемки оси ВПП вычисляется превышение наивысшей точки оси, для которой указываются номер пикета и расстояние от него, а также строятся продольные профили превышений оси ВПП относительно порога (рис. 2). На профиле указываются номера пикетов и значения превышений. Профили приводятся в техническом отчете о геодезической привязке аэродрома.

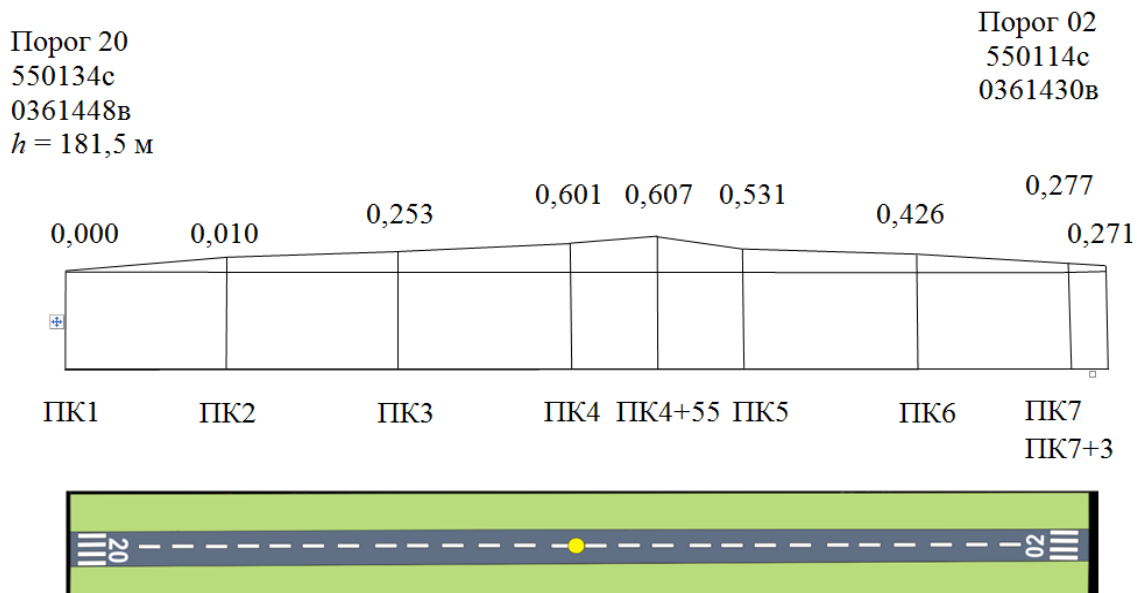


Рис. 2. Продольный профиль оси ВПП

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные исследования методики проводились на аэродроме в Новгородской области (рис. 3) с использованием РС (CC EFT RS1 GNSS – BRCH). Измерения спутниковой аппаратурой выполнялись в соответствии с работой [7].

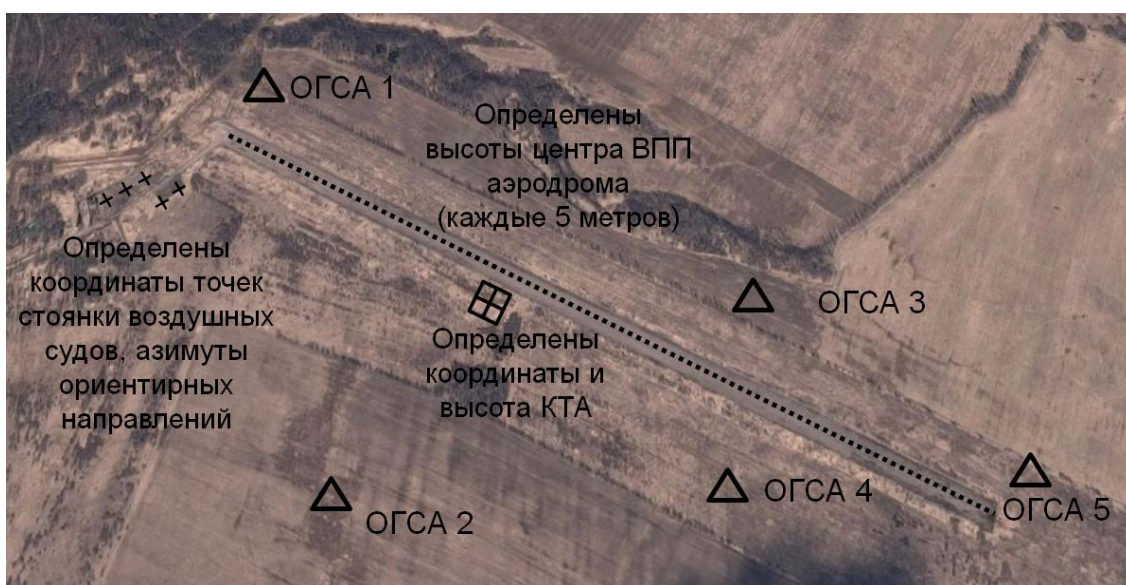


Рис. 3. Схема работ по геодезической привязке аэродрома (г. Боровичи)

При выполнении экспериментов использовались спутниковые приемники Topcon GB-500, PC EFT RS1 GNSS, ровер Leica GS08plus с контролером GS15 3.5G, электронный тахеометр Leica 1201+ с комплектом отражателей, электронный нивелир Trimble DiNiс комплектом инварных реек. В режиме RTK определялись геодезические координаты и высоты ОГСА, нормальные и геодезические высоты ВПП, геодезические координаты и высоты точек стоянок воздушных судов, КТА. Результаты математической обработки измерений приведены в табл. 1 и 2. Кроме того, выполнена крупномасштабная съемка аэродрома в масштабе 1:500.

Таблица 1

Координаты и высоты точек ОГСА

Имя точки	X, м	Y, м	Z, м	$H_{\text{норм}},$ м	PDOP	СКО X, Y, м	СКО H, м
ОГСА 1	778155,477	866786,181	5411269,293	107,712	1,79	0,01	0,02
ОГСА 2	778261,147	866381,182	5411353,209	106,890	1,48	0,01	0,01
ОГСА 3	778324,268	866057,460	5411428,268	103,782	1,39	0,01	0,01
ОГСА 4	778381,136	865567,990	5411559,246	97,256	1,25	0,01	0,02
ОГСА 5	778610,002	865493,212	5411464,820	94,441	1,48	0,01	0,01

Таблица 2

Координаты и высоты точек стоянки воздушных судов

Имя точки	X, м	Y, м	Z, м	$h_{\text{норм}},$ м	PDOP	СКО X, Y, м	СКО H, м
t1	778567,779	865478,261	5411491,027	94,059	1,25	0,01	0,01
t2	778550,975	865487,129	5411497,025	94,454	1,25	0,01	0,01
t3	778534,016	865495,759	5411503,235	94,893	1,25	0,01	0,01
t4	778516,777	865503,623	5411509,700	95,204	1,25	0,01	0,01
t5	778499,768	865512,254	5411515,641	95,393	1,30	0,01	0,01
t6	778518,583	865550,152	5411494,244	96,396	1,30	0,01	0,01
t7	778501,133	865557,070	5411501,011	96,597	1,30	0,01	0,01

Для геодезического обеспечения ВПП проведено геометрическое нивелирование полосы с шагом 5 м. Всего получены высоты 254 точек. Результаты геометрического нивелирования были приняты за эталонные. Далее по точкам геометрического нивелирования выполнены спутниковые наблюдения в режиме RTK относительно пунктов ОГСА. В результате среднее квадратическая ошибка значений этих высот от эталонных, полученных из геометрического нивелирования, составило не более 0,046 м (табл. 3, рис. 4).

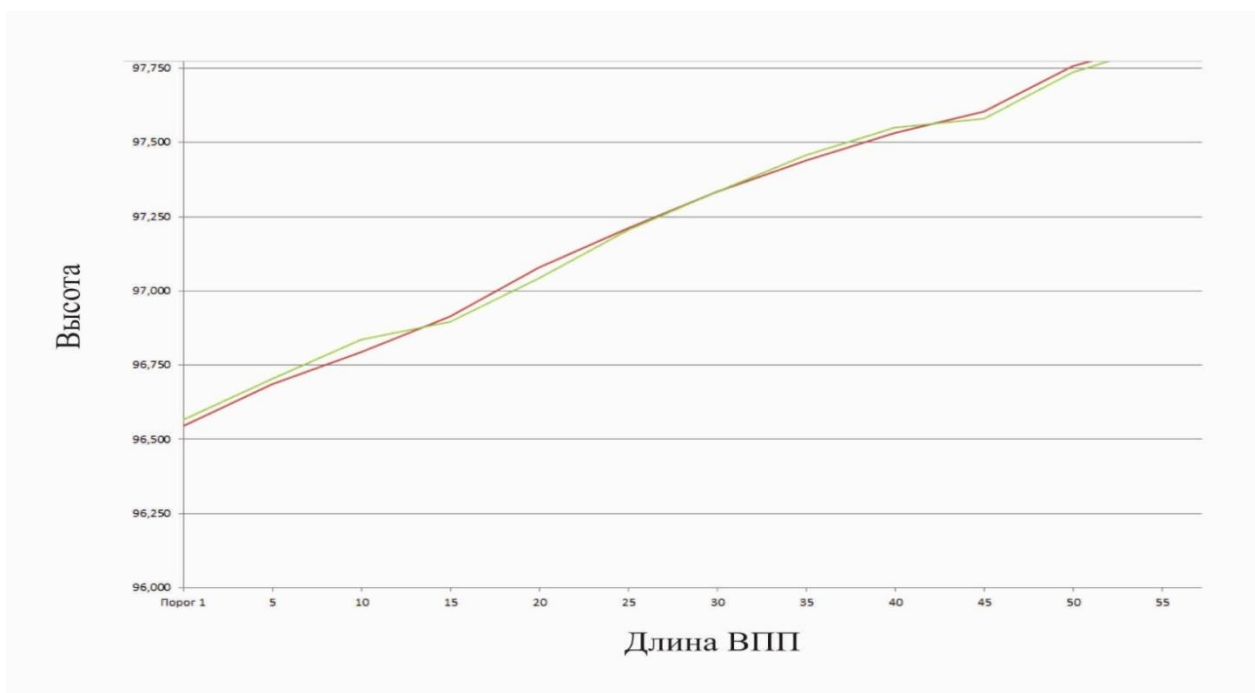


Рис. 4. Профиль ВПП аэродрома, полученный из результатов геометрического (красный цвет) и спутникового (зеленый цвет) нивелирования

Таблица 3

Фрагмент результатов измерения нормальной высоты геометрическим и спутниковым нивелированием

Имя точки	$h_{\text{норм нив.}}, \text{ м}$	$h_{\text{норм RTK}}, \text{ м}$	$\Delta h_{\text{норм}}, \text{ м}$
Порог 1	96,566	96,545	0,021
Точка 5	96,704	96,685	0,019
Точка 10	96,835	96,794	0,041
Точка 15	96,895	96,913	-0,018
Точка 20	97,044	97,080	-0,036
...
Точка 1255	107,650	107,667	-0,017
Точка 1260	107,660	107,677	-0,017
Точка 1265	107,618	107,624	-0,006
Порог 2	107,632	107,651	-0,019

Результаты натурных измерений показали, что применение РС обеспечивает необходимую точность решения задач по обеспечению геодезическими данными аэродромов государственной авиации, также оно позволяет повысить оперативность решения задач за счет применения режима RTK.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования по оценке возможностей применения референчных станций для геодезической подготовки элементов аэродромов государственной авиации показали, что их использование обеспечивает получение координат и высот пунктов на ВПП со средней квадратической ошибкой менее 5 см, что удовлетворяет современным и перспективным требованиям пилотажно-навигационных комплексов.

Применение спутниковой геодезической аппаратуры, работающей в режиме РТК, позволяет, с одной стороны, иметь необходимую точность геодезического обеспечения ВПП, а с другой стороны, существенно повысить оперативность, которую невозможно достичь при использовании традиционных методов координатных определений в геодезии.

Список используемых источников

1. Руководство по всемирной геодезической системе – 1984 (WGS-84). – 2-е изд. – ИКАО, 2002.
2. Аэродромы: прил. 14 к Конвенции о международной гражданской авиации. – Изд. восьмое. – 2018. – Т. 1: Проектирование и эксплуатация аэродромов. – 369 с.
3. Об утверждении федеральных авиационных правил «Требования, предъявляемые к аэродромам, предназначенным для взлета, посадки, руления и стоянки гражданских воздушных судов»: приказ Минтранса России от 25.08.2015 г. № 262. – URL: <https://base.garant.ru/71220192/> (дата обращения: 02.04.2020).
4. Воздушный кодекс Российской Федерации от 19 марта 1997 года №60-ФЗ. – URL: <https://base.garant.ru/10200300/> (дата обращения: 02.04.2020).
5. О введении в действие Методических рекомендаций по проведению геодезической съемки аэронавигационных ориентиров и препятствий в общеземных системах координат на аэродромах Российской Федерации, обеспечивающих неточные заходы на посадку: распоряжение Минтранса РФ от 10.01.2012 N ИЛ-1-р. – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70034004/> (дата обращения: 02.04.2020).
6. Требования к геодезическому обеспечению сертификации государственных аэродромов / Д.О. Медяников [и др.] // Информация и Космос: научно-техн. журн. – СПб., 2018. – № 2. – С. 113–118.
7. Медяников Д.О., Яковлев А.И. Методика определения геодезических данных в режиме реального времени (РТК) // Труды ИПА РАН. – 2018. – Вып. 45. – С. 61–65.

А.Н. Григорьев,
доктор технических наук, доцент;
Е.А. Дудин,
кандидат технических наук, доцент;
Д.Н. Комраков

МОДЕЛЬ МНОГОМАРШРУТНОЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СЪЕМКИ ПЛОЩАДНОГО ОБЪЕКТА ИЗ КОСМОСА

В статье представлены результаты разработки аналитического аппарата для оценивания потенциальной результативности многомаршрутной оптико-электронной съемки площадного объекта, выполняемой космическим аппаратом на одном витке полета. В качестве показателя результативности съемки принято значение площади, отснятой с заданными требованиями за один цикл применения космического аппарата.

В рамках разработанной математической модели оптико-электронной съемки площадного объекта учтены ключевые параметры съемки, требования, предъявляемые к фотограмметрическому качеству получаемых снимков, пространственные свойства площадного объекта и характеристики космического аппарата дистанционного зондирования Земли. При формализации многомаршрутной оптико-электронной съемки сформулированы ограничения и допущения, на основе которых получена система уравнений, описывающих связь учитываемых параметров съемки и заданных требований.

Представлено решение полученной системы уравнений, позволяющее в явном виде получить оценку числа потенциально реализуемых маршрутов съемки площадного объекта, характеризуемого заданным удлинением. С использованием имитационного подхода выполнена проверка адекватности разработанной модели для частных условий съемки площадного объекта. На отдельных контрольных примерах показаны результаты расчета потенциальной результативности оптико-электронной съемки площадного объекта, характеризуемого разным удлинением.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, космический аппарат, бортовой специальный комплекс, площадной объект, многомаршрутная оптико-электронная съемка, фотограмметрическое качество.

ВВЕДЕНИЕ

Для решения отдельных прикладных задач дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), связанных с получением или актуализацией пространственных данных об обширных территориях, требуется выполнение съемки площадных объектов. К таким объектам относятся участки местности, пространственный охват которых существенно больше размеров отдельного снимка на местности, получаемого конкретным средством ДЗЗ [1]. В таком случае для непрерывного покрытия площадного объекта снимками необходимо выполнение многомаршрутной съемки. В свою очередь, наибольшей результативностью съемки среди средств ДЗЗ характеризуются космические аппараты (КА), оснащенные оптико-электронными бортовыми специальными комплексами (БСК). При этом в качестве показателя результативности съемки предлагается рассматривать значение площади, отснятой с заданными требованиями за определенный интервал времени [2].

В общем оптико-электронная многомаршрутная съемка площадного объекта с использованием отдельного КА может осуществляться двумя способами, а именно: одномаршрутная съемка отдельных маршрутов на различных витках полета, с участков которых объект доступен для наблюдения, или многомаршрутная съемка с одного витка полета, которая обеспечивается современными системами трехосного управления движением КА [3]. Способ съемки площадного объекта на одном витке представляет особый практический интерес, так как обеспечивает получение значительных по площади пространственных данных при ограниченном временном ресурсе.

В настоящее время известны научные работы в предметной области, посвященной исследованию многомаршрутной съемки на одном витке полета КА. В исследовании [4] рассмат-

ривается задача многомаршрутной съемки заданного района на основе математической модели одиночного маршрута съёмки в режиме сканирования подстилающей поверхности. В работах [5, 6] представлен модифицированный аппарат теории оптимальных покрытий, с помощью которого решается задача оптимизации многомаршрутной съемки заданных районов, характеризующихся сложной геометрической формой. В статье [7] предлагается методика планирования работы БСК орбитальной группировки КА ДЗЗ, оценивается эффективность использования имеющихся ресурсов с целью оптимизации процесса съемки площадного объекта. В работе [8] описывается разработанный многокритериальный эволюционный алгоритм оптимизации многомаршрутной съемки с получением оценки результатов планирования применения КА.

Результаты анализа результатов исследований, в которых моделируется многомаршрутная съемка на одном витке полета КА, показывают, что в основном рассматриваются условия съемки конкретно заданных площадных объектов при известных факторах съемки. При этом отсутствуют аналитические модели, позволяющие на основе ключевых параметров орбитального полета и БСК оценить предельную потенциальную результативность съемки площадного объекта с использованием КА ДЗЗ. Наличие таких моделей требуется для решения задач более высокого уровня, состоящих в обосновании облика перспективных космических систем ДЗЗ на основе анализа чувствительности результативности съемки к вариациям внешних и внутренних факторов.

Таким образом, направление исследований по разработке аналитического аппарата, обеспечивающего оценивание потенциальной результативности многомаршрутной оптико-электронной съемки площадного объекта с использованием КА ДЗЗ, является актуальным. Исследование выполняется с целью проверки возможности по получению аналитической зависимости результативности съемки, выполняемой в известных условиях, от основных действующих факторов. Для достижения указанной цели считается необходимым решение задач по разработке модели оптико-электронной многомаршрутной съемки с КА ДЗЗ, выполняемой по заданному площадному объекту на одном витке полета, с проверкой ее адекватности, а также выполнение вычислительного эксперимента по оцениванию результативности такой съемки при типовых условиях.

ИССЛЕДУЕМЫЙ ВАРИАНТ МНОГОМАРШРУТНОЙ СЪЕМКИ ПЛОЩАДНОГО ОБЪЕКТА

В общем случае, за счет трехосного управления движением КА ориентация маршрутов при съемке площадного объекта может выбираться произвольным образом [3]. В рамках настоящего исследования предлагается рассмотреть условия выполнения многомаршрутной съемки параллельными прямолинейными маршрутами, ориентированными вдоль трассы КА ДЗЗ и расположенными с заданным перекрытием p_y (рис. 1). Соблюдение значения перекрытия p_y , определяемого, как правило в процентах (%), обеспечивает выполнение одного из основных требований к фотограмметрическому качеству получаемых снимков. Значение перекрытия p_y зависит от свойств рельефа местности на территории площадного объекта и от требований, предъявляемых с учетом особенностей последующей фотограмметрической обработки в интересах потребителя.

Рассматриваемый цикл многомаршрутной съемки по времени состоит из интервалов, в течение которых ведется съемка текущего маршрута или выполняется перенацеливание БСК на следующий маршрут. Схематично частный вариант перенацеливания БСК представлен на рис. 1, б. При реализации рассматриваемого варианта многомаршрутной съемки перенацеливание БСК осуществляется в основном за счет разворота КА по углу тангажа. В рамках настоящего исследования предлагается не учитывать изменение угла крена при перенацеливании КА. В качестве ограничения принимается, что линейная скорость сканирования при

съемке местности с использованием БСК соответствует скорости движения подспутниковой точки V_{sp} , то есть выполняется синхронная маршрутная съемка.

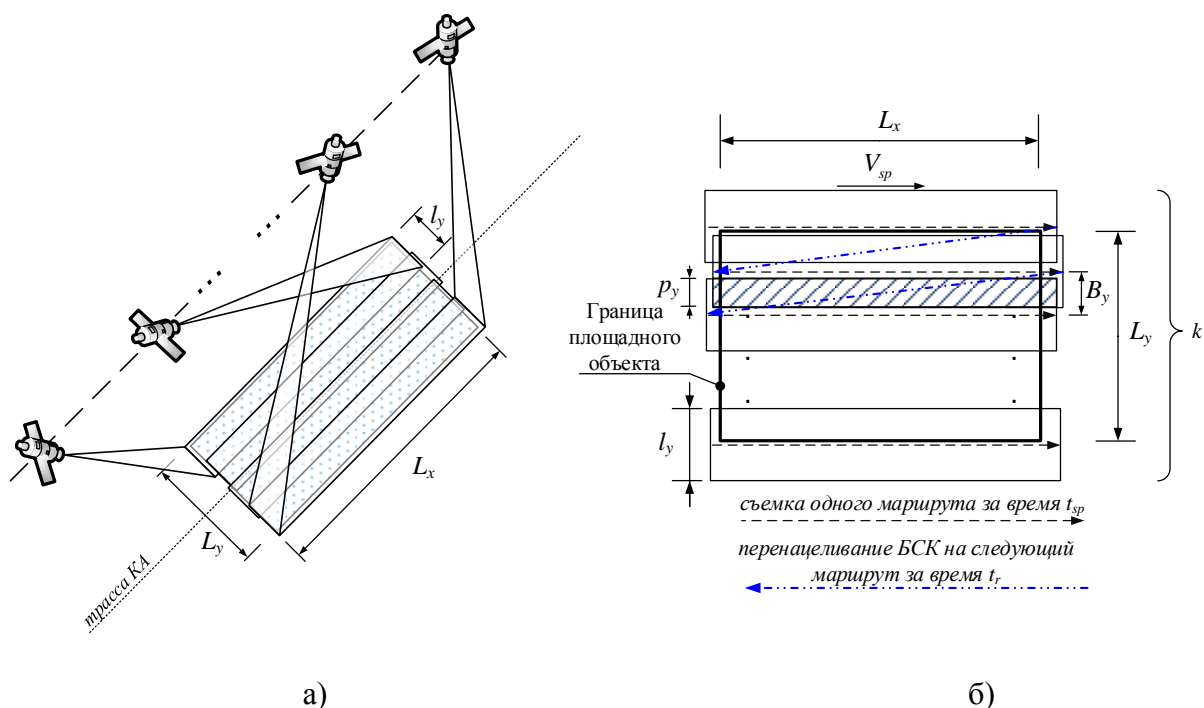


Рис. 1. Принцип многомаршрутной съемки площадного объекта:

а – съемка площадного объекта на одном витке; б – последовательность съемки маршрутов и перенацеливания БСК

Отдельный маршрут съемки характеризуется полосой захвата l_y и протяженностью L_x . Площадной объект имеет простую форму прямоугольника со сторонами L_x и L_y (рис. 1, а). Съемка одного маршрута выполняется за интервал времени t_{sp} , а перенацеливание БСК на начало очередного маршрута – за интервал времени t_r . Оси соседних маршрутов разнесены на межмаршрутное расстояние B_y (рис. 1, б).

Преимущество использования такого варианта многомаршрутной съемки состоит в том, что в процессе регистрации снимка не выполняется маневр по развороту КА вокруг центра масс. Система управления движением обеспечивает стабилизацию ориентации КА, при которой имеют место наиболее благоприятные условия регистрации снимка. При этом недостаток использования такого варианта связан с увеличенными интервалами времени на перенацеливание БСК. В рамках настоящего исследования предлагается использовать изложенный вариант многомаршрутной съемки площадного объекта.

МОДЕЛЬ МНОГОМАРШРУТНОЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СЪЕМКИ ПЛОЩАДНОГО ОБЪЕКТА

Для построения аналитической модели многомаршрутной оптико-электронной съемки предлагается частично использовать подход, описанный в работе [9]. Принимаются следующие допущения в отношении формы Земли и орбиты КА ДЗЗ. В пределах площадного объекта подстилающая поверхность описывается плоскостью, а КА ДЗЗ движется по прямолинейной траектории над этой плоскостью на высоте H (рис. 2). Для описания условий оптико-электронной съемки отдельных маршрутов из космоса дополнительно задаются следующие параметры: предельный угол отклонения по тангажу ω и угловую скорость перенацеливания БСК ν_r .

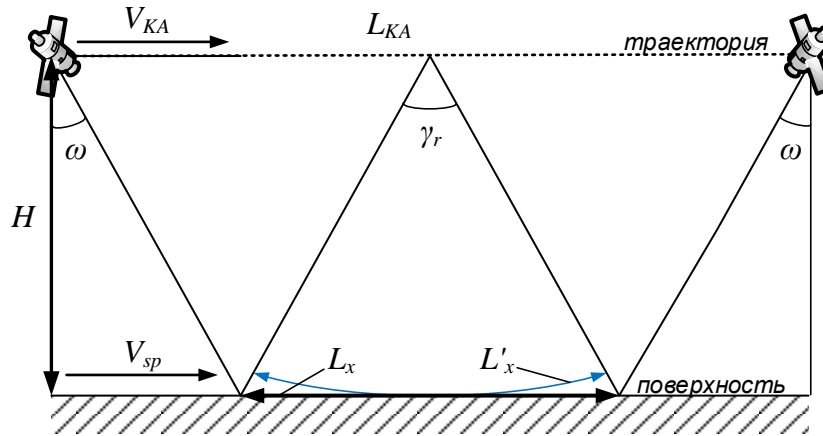


Рис. 2. Геометрическое построение, поясняющее условия съемки площадного объекта и принятые допущения

Протяженность участка орбиты КА ДЗЗ $L_{КА}$, при прохождении которого выполняется многомаршрутная съемка объекта, определяется по геометрическому построению (рис. 2)

$$L_{КА} = L_x + H \cdot \tan \omega. \quad (1)$$

По значению $L_{КА}$ определяется интервал времени $t_{КА}$, имеющийся для многомаршрутной съемки площадного объекта:

$$t_{КА} = \frac{L_{КА}}{V_{КА}}, V_{КА} = \sqrt{G \cdot \frac{M}{R_3 + H}}, \quad (2)$$

где $V_{КА}$ – скорость орбитального движения КА; G – гравитационная постоянная $G = 6,67259 \cdot 10^{-11} [м^3 \cdot кг^{-2} \cdot с^{-2}]$; M – масса Земли $M = 5,97 \cdot 10^{24} [кг]$; R_3 – средний радиус Земли $R_3 = 6371000$ м.

В свою очередь для оценивания интервала времени t_r , затрачиваемого на выполнение перенацеливания на следующий маршрут съемки, предлагается следующий упрощенный подход, основанный на допущении $L_x \approx L'_x$ (рис. 2)

$$t_r = \frac{\gamma_r}{\nu_r} \approx \frac{L_x}{\nu_r \cdot H}; \gamma_r = \frac{L'_x}{H} \approx \frac{L_x}{H}, \quad (3)$$

где угловая скорость перенацеливания ν_r задана в единицах [рад/с], а угол γ_r – в [рад].

На основе (2) и (3) определяется интервал времени съемки t_s – суммарная продолжительность интервалов времени, в течение которых выполняется съемка k маршрутов

$$t_s = t_{КА} - t_r \cdot (k - 1) = \frac{L_{КА}}{V_{КА}} - \frac{\gamma_r}{\nu_r} \cdot (k - 1). \quad (4)$$

Согласно исследуемому варианту многомаршрутной съемки сторона площадного объекта L_x посредством расчета скорости подспутниковой точки V_{sp} с учетом (4) вычисляется по формулам:

$$L_x = \frac{V_{sp} \cdot t_s}{k}; V_{sp} = V_{КА} \cdot \frac{R_3}{R_3 + H}. \quad (5)$$

Сторону площадного объекта L_y предлагается рассчитывать по формуле, позволяющей учесть требование по расположению крайних маршрутов, состоящее в том, чтобы оси этих маршрутов размещались по границе площадного объекта,

$$L_y = l_y + B_y \cdot (k - 1); B_y = l_y \cdot \left(\frac{100 - p_y}{100} \right). \quad (6)$$

В свою очередь, площадной объект предлагается характеризовать площадью S и удлинением E [8]:

$$S = L_x \cdot L_y, \quad E = \frac{L_x}{L_y}. \quad (7)$$

На основе формул (5)–(7) получена следующая система уравнений:

$$\begin{cases} L_x = \frac{H^2 \cdot V_{sp} \cdot v_r \cdot \operatorname{tg} \omega - V_{sp} \cdot V_{KA} \cdot (t_r \cdot k - t_r)}{k \cdot (V_{sp} \cdot V_{KA} + V_{KA} \cdot H \cdot v_r) - V_{sp} \cdot H \cdot v_r - V_{sp} \cdot V_{KA}} \\ L_y = l_y + B_y \cdot (k - 1) \\ L_x = E \cdot L_y \end{cases}. \quad (8)$$

Первое уравнение в системе (8) получено на основе формулы (5) с учетом выражения для определения интервала времени t_s (4). Путем преобразования представленной системы уравнений выводятся алгебраические полные квадратные уравнения с переменной, в качестве которой выступает длина стороны объекта L_x

$$V_{KA} (Hv_r + V_{sp}) L_x^2 - E (l_y V_{KA} H v_r + l_y V_{sp} V_{KA} - B_y V_{KA} H v_r + B_y V_{sp} H v_r) L_x - E B_y H^2 V_{sp} \tan \omega = 0, \quad (9)$$

или число маршрутов съемки k

$$\begin{aligned} & E B_y V_{KA} (V_{sp} + H v_r) k^2 + E (l_y V_{sp} V_{KA} + l_y V_{KA} H v_r - B_y V_{sp} H v_r - 2 B_y V_{sp} V_{KA} - B_y V_{KA} H v_r) k - \\ & - E V_{sp} \left(l_y H v_r + l_y V_{KA} - B_y H v_r - B_y V_{KA} + \frac{(H^2 v_r \tan \omega)}{E} \right) = 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Примеры графиков квадратичной функции, соответствующей уравнению (10), при условно-реальных значениях параметров: высоты орбиты H , удлинения объекта E и скорости перенацеливания БСК v_r , представлены на рис. 3. По представленным графикам видно, что уравнение имеет два вещественных корня.

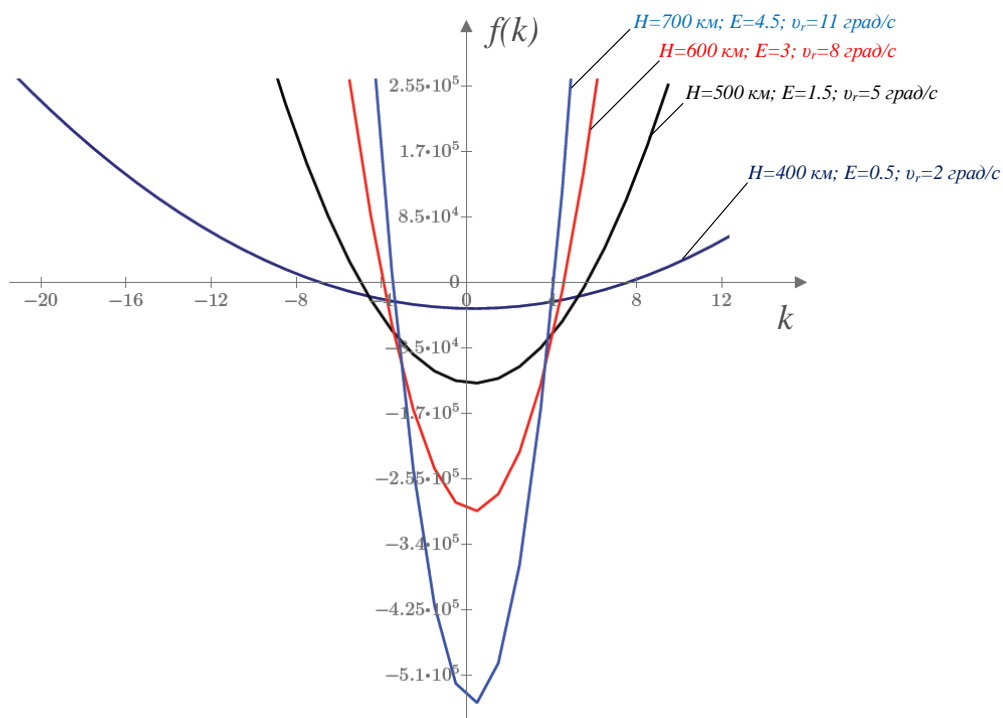


Рис. 3. Семейство графиков квадратичной функции при разных значениях параметров многомаршрутной съемки

Положительный по значению корень уравнения (9) при заданных параметрах ведения многомаршрутной съемки из космоса l_y , B_y , V_{KA} , v_r , t_s и удлинении площадного объекта E позволяют оценить длину стороны площадного объекта L_x . Аналогичным образом в результате решения уравнения (10) определяется число маршрутов k , покрывающих площадной объект.

Корни уравнений (9) и (10) рассчитываются по формулам:

$$k = \frac{-\left(E(l_y V_{KA} V_{sp} + l_y V_{KA} H v_r - B_y H V_{sp} v_r - 2B_y V_{KA} V_{sp} - B_y V_{KA} H v_r)\right) + \sqrt{D_1}}{2EB_y V_{KA} (V_{sp} + H v_r)},$$

$$D_1 = E^2 \left(l_y V_{KA} V_{sp} + l_y V_{KA} H v_r - B_y H V_{sp} v_r - 2B_y V_{KA} V_{sp} - B_y V_{KA} H v_r\right)^2 +$$

$$+ 4EB_y V_{KA} (V_{sp} + H v_r) EV_{sp} \left(l_y H v_r + l_y V_{KA} - B_y H v_r - B_y V_{KA} + \frac{(H^2 v_r \tan \omega)}{E}\right); \quad (11)$$

$$L_x = \frac{-\left(E(V_{KA} l_y H v_r + l_y V_{KA} V_{sp} - V_{KA} B_y H v_r + V_{sp} B_y H v_r)\right) + \sqrt{D_2}}{2V_{KA} (H v_r + V_{sp})},$$

$$D_2 = V_{KA}^2 (V_{sp} + H v_r)^2 - 4V_{KA} (V_{sp} + H v_r) EB_y H^2 V_{sp} v_r \tan(\omega),$$

где D_1 и D_2 – дискриминанты квадратных уравнений (9) и (10).

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТ ПРОВЕРКИ АДЕКВАТНОСТИ РАЗРАБОТАННОЙ МОДЕЛИ

Для проверки адекватности разработанной модели многомаршрутной оптико-электронной съемки площадного объекта предлагается сравнить результаты, получаемые по формулам (11), и оценки, вычисляемые с использованием имитационного подхода. Указанный подход, в общем, заключается в расчете числа реализуемых маршрутов путем сравнения общего времени, имеющегося для многомаршрутной съемки площадного объекта с заданным значением длины стороны L_x , и времени на съемку одного маршрута протяженностью L_x . Схема, поясняющая предложенный подход и методику расчетов для проверки адекватности, представлена на рис. 4.

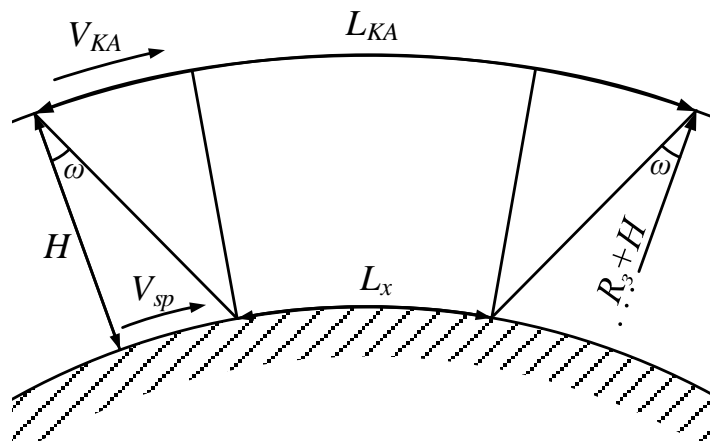


Рис. 4. Геометрическое построение для проверки адекватности разработанной модели с учетом кривизны Земли

Методика определения числа реализуемых маршрутов состоит в выполнении следующих расчетов:

1. Вычисление расстояния L'_{KA} с учетом кривизны Земли по предложенной формуле

$$L'_{KA} = (H + R_3) \cdot \left(\left(\arcsin \left[\left(1 + \frac{H}{R_3} \right) \cdot \sin \omega \right] - \omega \right) + \frac{L_x}{R_3} \right). \quad (12)$$

2. Расчет общего интервала времени t'_{KA} , имеющегося для съемки площадного объекта, по формуле (2) на основе результата вычисления (12).

3. Расчет интервала времени t'_{sp} , затрачиваемого на съемку одного маршрута протяженностью L_x , по формуле

$$t'_{sp} = \frac{L_x}{V_{sp}}. \quad (13)$$

4. Расчет времени перенацеливания БСК t_r на следующий маршрут съемки по формуле (3).

5. Расчет продолжительности интервала времени выполнения съемки одного маршрута с учетом времени на перенацеливания БСК по формуле

$$t'_s = t'_{sp} + t_r. \quad (14)$$

6. Расчет числа реализуемых маршрутов k' по формуле

$$k' = \frac{t'_{KA}}{t'_s}. \quad (15)$$

Результаты вычисления контрольных примеров, подтверждающие адекватность разработанной модели многомаршрутной съемки площадного объекта, представлены в табл. 1. В качестве исходных данных использованы разные значения L_x и v_r (табл. 1). Значения других параметров съемки для всех примеров составляют: $H = 400$ км, $\omega = 40^\circ$, $E = (0,5; 1,5; 3; 4,5)$, $l_y = 10$ км, $p_y = 30\%$. Полученные значения k и k' представлены в табл. 1. В качестве показателя близости значений k и k' использована мера δ , вычисляемая по формуле

$$\delta = \frac{|k - k'|}{k} \cdot 100\%. \quad (16)$$

Таблица 1

Исходные и промежуточные данные для расчета числа маршрутов k и k'

L_x , км	v_r , °/с	L_{KA} , км	L'_{KA} , км	k	k'	δ , %
110	2	483,168	482,056	2,836	2,699	4,8
95	5	466,043	466,114	3,707	3,827	3,2
65	8	434,793	434,231	5,214	5,526	5,7
36	11	403,862	403,410	8,865	9,528	7

Таким образом, выполненное исследование по проверке адекватности разработанной модели многомаршрутной съемки и, в частности, представленные контрольные примеры показывают близость результатов, получаемых на основе изложенных подходов, и подтверждают возможность использования разработанного математического аппарата.

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ОЦЕНИВАНИЮ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ МНОГОМАРШРУТНОЙ СЪЕМКИ

Для получения оценок потенциальной результативности многомаршрутной съемки с использованием разработанного математического аппарата проведен эксперимент на примере условно-реального КА ДЗЗ с оптико-электронным БСК. Потенциальная результативность определяется путем оценивания площади S' , которая может покрываться материалами многомаршрутной съемки при условии полного расходования ресурса по времени съемки t_{KA} . Космический аппарат ДЗЗ и БСК характеризуются набором параметров: $H = 400$ км, $\omega = 40^\circ$,

$v_r = 2; 5; 8; 11$ °/с, $l_y = 10$ км. Площадной объект описывается удлинением $E = 0,5; 1,5; 3; 4,5$. В качестве требования к материалам съемки задается перекрытие $p_y = 60$ %. Как видно в качестве варьируемых параметров используются скорость перенацеливания v_r и удлинение площадного объекта E . В результате показатель результативности оценивается для 16 вариантов исходных данных.

При выполнении расчетов в первую очередь определяются параметры, которые не заданы в исходных данных и необходимы для формирования уравнений (9) и (10), а именно: $V_{КА}$, V_{sp} и B_y . Для этого используются выражения из наборов формул (2), (5) и (6) соответственно. На основе решения квадратных уравнений (11) для каждой комбинации заданных значений v_r и E вычисления могут выполняться по одному из двух способов.

Первый способ состоит в определении числа маршрутов k (11) с последующим расчетом L_y (6). По зависимостям, описанным формулами (7), по заданному удлинению вычисляется L_x и находится значение показателя потенциальной результативности S' .

Второй способ основывается на расчете длины объекта L_x (11) с последующим определением L_y через заданное удлинение площадного объекта. По рассчитанным значениям длины сторон объекта вычисляется значение показателя потенциальной результативности S' .

На рис. 5 представлен график, демонстрирующий результаты расчета потенциальной результативности многомаршрутной съемки площадного объекта S' , показывающие ее зависимость от удлинения площадного объекта и от скорости перенацеливания БСК.

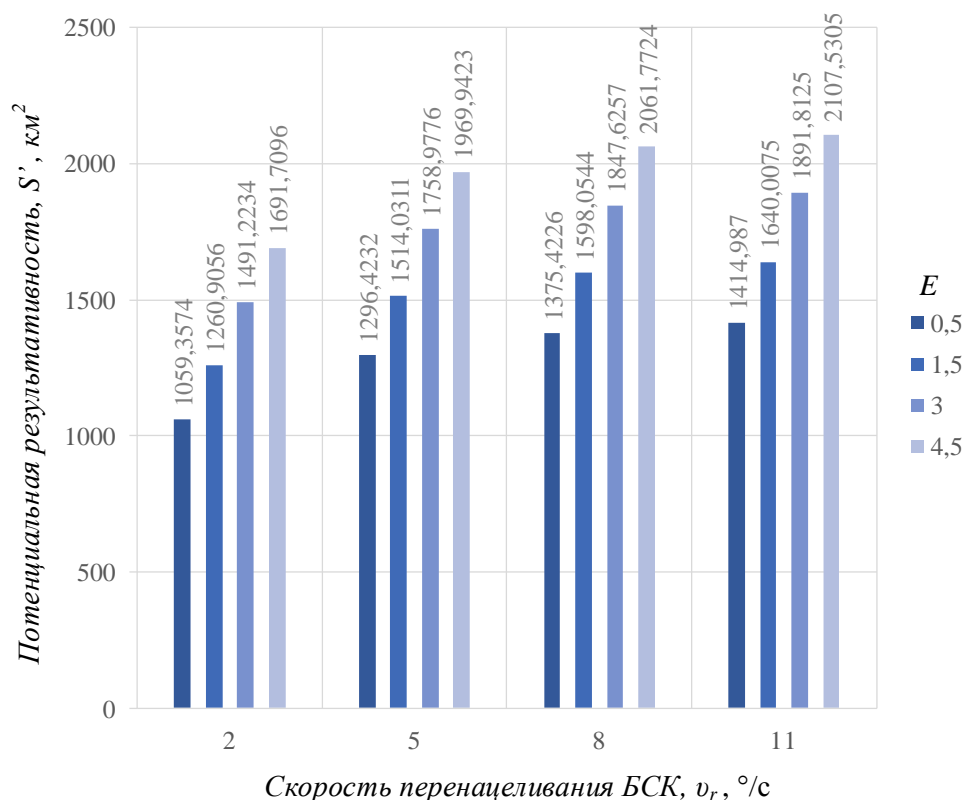


Рис. 5. Результаты расчетов числа маршрутов при заданных условиях съемки

Полученные результаты показывают, что большая потенциальная результативность многомаршрутной съемки обеспечивается при увеличении удлинения площадного объекта. То есть большая результативность имеет место при съемке объекта, более вытянутого вдоль трассы КА ДЗЗ. При этом с увеличением удлинения объекта отмечается сокращение процента потенциальной результативности. В свою очередь, существенное увеличение скорости

перенацеливания БСК при многомаршрутной съемке не обеспечивает существенного улучшения потенциальной результативности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на основе выбранного варианта выполнения многомаршрутной съемки площадного объекта разработана соответствующая аналитическая модель, учитывающая параметры аппаратуры космического аппарата дистанционного зондирования Земли, пространственные свойства площадного объекта съемки и требования к оптико-электронной многомаршрутной съемке местности. Особенность модели состоит в описания формы объекта многомаршрутной съемки относительным параметром – удлинением, что избавляет от необходимости анализировать объект с конкретными размерами и позволяет определять потенциальную результативность многомаршрутной съемки площадного объекта заданной формы.

Проверка разработанной аналитической модели на адекватность, основанная на имитации последовательности этапов съемки отдельных маршрутов и выполнения перенацеливания на следующий маршрут, подтвердила возможность ее использования для предварительного оценивания возможности использования космического аппарата дистанционного зондирования Земли для многомаршрутной съемки площадного объекта. Выполненный вычислительный эксперимент подтвердил реализуемость разработанного математического аппарата и позволил выявить частные зависимости потенциальной результативности многомаршрутной съемки от удлинения объекта и скорости перенацеливания оптико-электронного бортового специального комплекса.

В качестве дальнейшего направления исследований целесообразно рассматривать анализ чувствительности показателя результативности съемки к изменению параметров, характеризующих космический аппарат дистанционного зондирования Земли и условия его функционирования.

Список используемых источников

1. Григорьев А.Н., Дмитриков Г.Г., Попович Т.В., Пятицкий А.А., Смирнова О.В. Принципы и примеры использования технологии дистанционного зондирования в информационном обеспечении инфраструктур пространственных данных // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 664. – С. 51–59.
2. Григорьев А.Н., Дмитриков Г.Г., Дубровин Д.А., Пятицкий А.А., Рябчевский В.Ю. Частные показатели эффективности применения беспилотных летательных аппаратов при ведении аэросъемочных работ // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Применение беспилотных летательных аппаратов в географических исследованиях». – Иркутск: Изд-во ин-та географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2018. – С. 55–59.
3. Основы устройства и моделирования целевого функционирования космических аппаратов наблюдения: учеб. пособие / В.И. Куренков [и др.]. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006 – 296 с.
4. Алферов А.В., Комраков Д.Н., Сквасников М.А. Алгоритм оценивания состава группировки орбитальных и воздушных средств дистанционного зондирования Земли в задаче съемки площадного объекта // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2017. – Вып. 659. – С. 25–34.
5. Горелов Ю.Н., Юрин В.Е. Об оптимальном многомаршрутном сканировании для космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Известия СамНЦ РАН. – 2013. – Т. 15, № 6. – С. 140–147.

6. Горелов Ю.Н., Курганская Л.В., Юрин В.Е. Об оптимальном сканировании криволинейных маршрутов съемки и геометрически сложных районов зондирования с помощью оптико-электронной аппаратуры наблюдения // Сборник трудов ИТНТ-2018 / Самарский национальный исследовательский ун-т имени академика С.П. Королева. – 2018. – С. 1514–1524.
7. Галузин В.А., Симонова Е.В. Планирование съемки площадных объектов наблюдения группировкой космических аппаратов // Известия СамНЦ РАН. – 2018. – Т. 20, № 6-2 (86). – С. 344–351.
8. Multi-objective Mission Planning Problem of Agile Earth Observing Satellites / K. Sun [et al.] // Proceedings of the 12th International Conference on Space Operations. – 2012. – Vol. 4. – P. 2802–2810.
9. 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. 674. – С. 276–286.

А.М. Девяткин,
доктор технических наук, профессор;
А.В. Панков,
кандидат военных наук, доцент

КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ МЕТОДОВ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОЙ РАБОТЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ИНФОРМАЦИОННЫХ РЕШЕНИЙ

Реализуемые в настоящее время в Российской Федерации преобразования, направленные на совершенствование процессов информационного обеспечения органов военного управления, в значительной степени изменили содержание информационно-аналитической деятельности.

Увеличение объемов информации, подлежащей учету, анализу и обобщению в интересах повышения эффективности принимаемых информационных решений, определяет необходимость внедрения автоматизированных технологий интеллектуальной обработки разнородных данных, оперативного моделирования вариантов решений, быстрой настройки инструментов на предметную область.

В статье представлен концептуальный подход к реализации методов машинного обучения для формирования моделей объектов мониторинга. Предложен способ агрегирования результатов неравноточного распознавания состояний объектов при использовании нескольких методов идентификации. Приводятся результаты эксперимента по оцениванию качества информационного решения при объединении результатов применения различных методов.

Ключевые слова: идентификация состояний объектов, нейронные сети, вероятностный анализ, комплексная обработка, моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Концепция развития системы управления ВС РФ до 2025 года определяет как одну из главных целей максимальную реализацию потенциальных возможностей сил (войск) на основе выработки и реализации своевременных и обоснованных решений в конкретных условиях динамично меняющейся обстановки. Результативность информационно-аналитической работы (ИАР) органов военного управления в значительной степени обуславливает своевременность принятия требуемых управленческих решений.

Обоснованность принимаемых решений определяется адекватностью при ведении ИАР используемых моделей объектов и процессов. Применяемые в процессе ведения ИАР экспертные системы, основанные на четко заданных моделях объектов, определяющих взаимосвязь исходных данных и формируемых решений о их состояниях, становятся малоэффективными.

Высокая динамика изменения оперативной обстановки формирует дополнительные требования к актуализации используемых при ведении ИАР моделей объектов мониторинга. Новое содержание в интересах реализуемой концепции приобретают процессы, связанные с совершенствованием ИАР.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РОЛИ СИСТЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОЙ РАБОТЕ

Возможности повышения эффективности ИАР в сложившихся условиях связаны с достижениями современных информационных технологий и направлены на реализацию систем искусственного интеллекта (ИИ).

Не погружаясь в философское осмысление содержания ИИ, связанного с имитацией мыслительной деятельности живого существа, необходимо отметить следующие особенности его теоретического осмысления на современном этапе развития информационных технологий.

В отличие от экспертных систем, позволяющих автоматизировать процедуры вывода на четко заданных логических правилах, современные информационные технологии определяют возможности реализации автоматизированных процедур приобретения знаний – машинного обучения.

В контексте современного восприятия *интеллектуальной* является система, способная целеустремленно, в зависимости от состояния информационных входов, изменять не только параметры функционирования, но и сам алгоритм своего поведения, выбор которого зависит не только от текущего состояния информационных входов, а также и от предыдущих состояний системы [1, 2].

Теоретическая возможность реализации интеллектуальной системы в ИАР основана на использовании конечного автомата, определяющего содержание процессов проведения оперативных расчетов, которые реализуются в различных ситуационных условиях, определяемых текущей полнотой исходных данных.

В качестве основных направлений реализации систем ИИ в ИАР органов военного управления предлагается рассматривать:

- автоматизацию процессов разработки и актуализации моделей объектов мониторинга;
- автоматизацию процессов ситуационной обработки данных в интересах повышения достоверности результатов ИАР.

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ ПОДХОД К РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ МОДЕЛЕЙ ОБЪЕКТОВ МОНИТОРИНГА

Совершенствование процессов информационно-аналитического сопровождения процессов государственного и военного управления, основывается на комплексном всестороннем исследовании объектов мониторинга. Объемы собираемой информации, используемой в различных сферах управления, обеспечивают ежегодное увеличение объемов мировых хранилищ данных на 20–25%. Современные достижения в сфере информатизации процессов военного управления можно продемонстрировать на примере Национального центра управления обороной (НЦУО) РФ. Реализованный в настоящее время суммарный объем системы хранения данных вычислительного комплекса территориально-распределительного центра обработки данных (ЦОД) Министерства обороны Российской Федерации составляет 236 петабайт. В закрытом сегменте передачи данных (ЗСПД) система обеспечивает информационное взаимодействие более 180 тыс. абонентов [3].

Оперативный анализ и обобщение таких массивов информации без использования автоматизированных средств обработки становятся практически невозможными. Потребность в непрерывной актуализации знаний о функционировании объектов мониторинга, в виде формализованных моделей, приводит к необходимости использования новых технологий, реализующих методы машинного обучения.

Машинное обучение – раздел теории искусственного интеллекта, описывающий методы формирования алгоритмов и на их основе программ, способных «обучаться» (накапливать опыт и корректировать алгоритм решения заданной задачи посредством подстройки используемой модели исследуемого объекта).

Концептуальный подход к реализации методов машинного обучения, в интересах мониторинга объектов наблюдения [4], основывается на использовании эмпирических данных (прецедентов), в которых выявляются закономерности и на их основе строятся модели объектов, позволяющие в дальнейшем решать задачи распознавания состояний.

Автоматизация процессов разработки и актуализации *моделей объектов мониторинга* формирует условия для существенного расширения признакового пространства, учитываемого при ведении ИАР. Избыточность описания объекта в автоматически сформированных «образах» его состояний («эталонных образах состояний») создает условия для повышения полноты отображения объекта в модели. Данная избыточность определяет дополнительные возможности повышения результативности решения задач определения состояний объектов, в условиях высокой динамики изменения оперативной обстановки, и неполноты исходных данных.

Общую основу решения большинства задач мониторинга состояний объектов составляет процесс идентификации – опознавания объекта по присвоенным ему идентификационным признакам.

Содержание решения задачи определяет формализованная процедура сопоставления заданного множества возможных состояний объекта мониторинга $\{S_j\}_j$ и $X_{(L)} = \langle x_1, x_2, \dots, x_L \rangle$ – вектора признаков, используемых в модели для идентификации данных состояний, где J – число состояний объекта, а L – число признаков.

Содержание процесса формирования модели объекта заключается в установлении функциональной взаимосвязи, обеспечивающей отображение $X_{(L)} \rightarrow \tilde{S}$: $\tilde{S} = f(X_{(L)}; A_{\diamond})$, где \tilde{S} – оценка состояния объекта, A_{\diamond} – параметры модели, $f(X_{(L)}; A_{\diamond})$ – функция, символизирующая отображение аргумента $X_{(L)}$ при заданных параметрах модели A_{\diamond} в значение S_i .

Общая схема этапов информационно-аналитической работы, связанных с реализацией методов машинного обучения в процессе идентификации состояний объектов мониторинга, представлена на рис. 1.

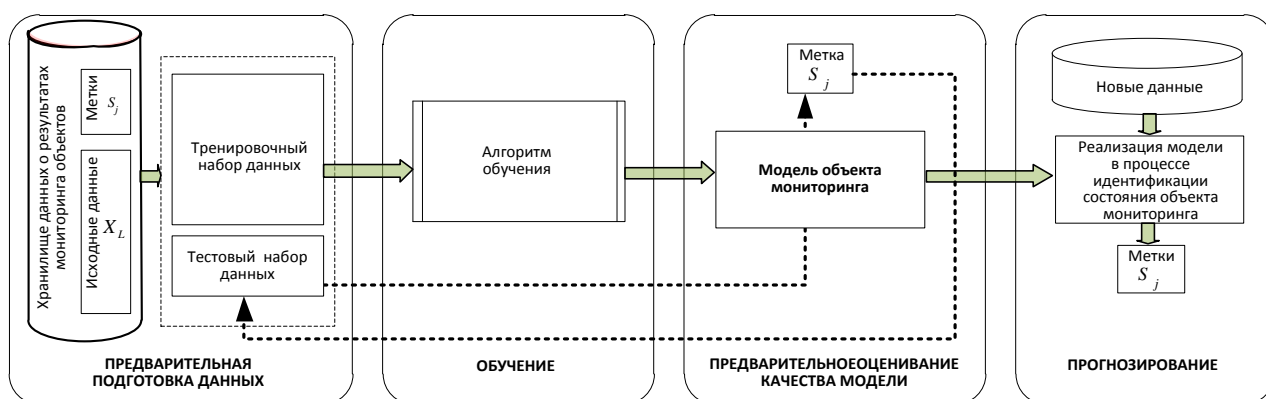


Рис. 1. Схема этапов информационно-аналитической работы, связанных с реализацией методов машинного обучения в процессе идентификации состояний объектов мониторинга

Специфика реализованного в методе алгоритма обучения позволяет выявить в имеющихся исходных данных различные закономерности и отразить их в формируемой модели объекта в виде A_{\diamond} параметров.

При этом качество исходных данных, зависящее от их полноты, достоверности и достаточности для реализации каждого из алгоритмов обучения, определяет различную адекватность формируемой модели объекту мониторинга и решаемой задаче распознавания. Предварительное оценивание качества сформированной модели производится в процессе обучения с использованием тестового набора данных, а окончательное – непосредственно при оценивании результатов прогнозирования.

Накопленный в органах управления массив информации, характеризующей результаты наблюдения объектов мониторинга, определяет возможности для формирования размеченно-

го массива исходных данных с целью реализации контролируемых методов машинного обучения, ориентированных на решение задачи классификации, таких как байесовские сети, деревья принятия решений, нейронные сети, K-ближайших соседей и др. [6].

Реализованные в современных условиях возможности оперативной автоматизированной обработки данных влияют на условия совместного применения данных методов, первоначальный состав которых может быть определен на основании критерия пригодности [7] к решению рассматриваемой задачи идентификации.

В данной статье особенности формируемых в процессе машинного обучения моделей объектов мониторинга предлагается рассмотреть на примере методов, реализующих нейросетевую технологию обработки данных, и методов, реализующих технологию логико-вероятностного вывода на основе формулы полной вероятности Байеса.

Применение нейросетевых технологий (НСТ) обработки данных в интересах совершенствования ИАР связано с анализом значительных по объему массивов данных о результатах наблюдения объекта мониторинга в качестве исходных образов состояний объектов, необходимых для обучения нейросети [6, 7]. Схема реализации процессов машинного обучения при использовании НСТ обработки данных в интересах уточнения моделей объектов представлена на рис. 2.

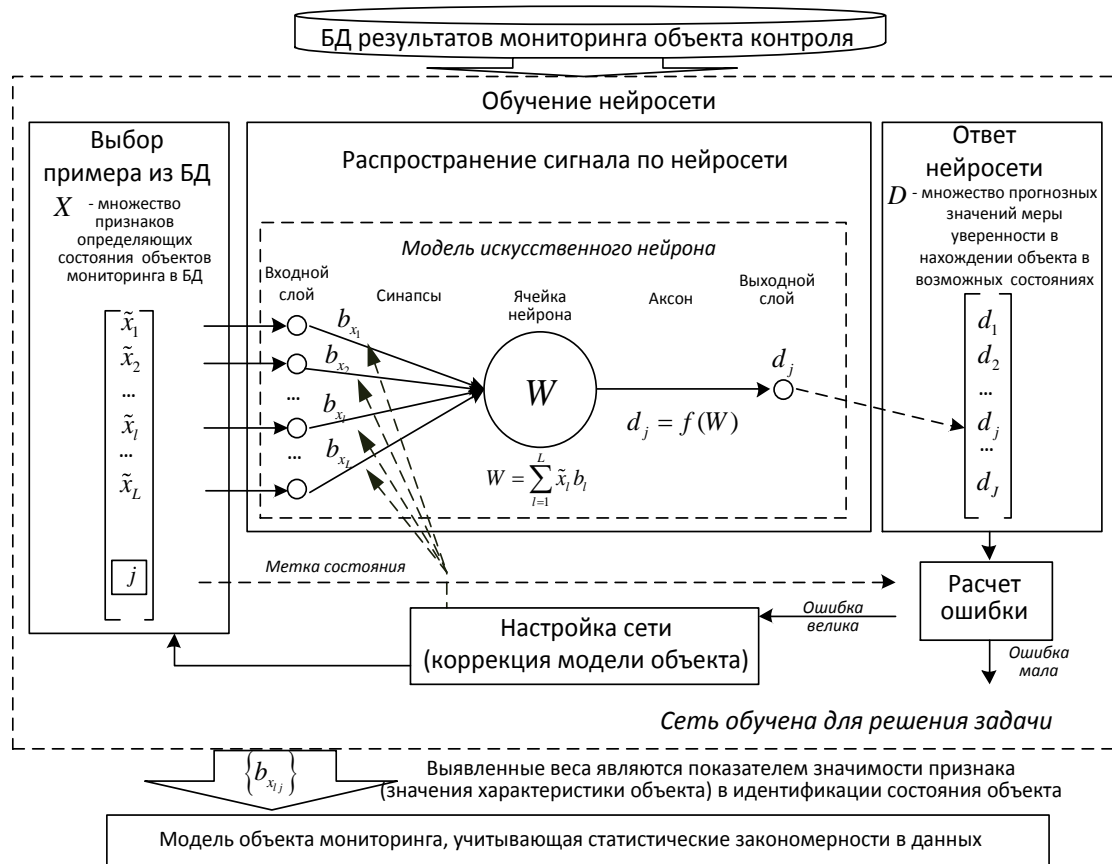


Рис. 2. Схема реализации машинного обучения при использовании нейросетевой технологии обработки данных

Формализованное выражение прогнозируемого d_j значения меры «уверенности» в наблюдении s_j -го состояния объекта мониторинга, определяемое на основе представленных $X_{(L)}$ исходных данных, может быть формализовано в следующем виде:

$$d_j = f_{\text{НС}}(X_{\langle L \rangle}, A_{\langle L \rangle}), \quad (1)$$

где $A_{\langle L \rangle}$ – параметры модели объекта, представленные текущими значениями b_{x_i} весовых коэффициентов синаптической связи x_i значений признаков для идентификации s_j -го состояния объекта мониторинга.

Следует отметить, что при реализации процессов обучения выбор параметров используемой нейросети (количество слоев нейронов, вид активационной функции и т. д.), определяющих содержание $f_{\text{НС}}$ функциональной зависимости, осуществляется заблаговременно и не подлежит изменению. При изменении параметров применяемой нейросети процесс машинного обучения производится заново.

Несмотря на то, что прогнозируемое d_j значения меры «уверенности» в наблюдении s_j -го состояния объекта мониторинга не являются вероятностями данных состояний, они могут быть к ним сведены с использованием в выходном слое нейросети функции *softmax* [8].

Реализация процессов машинного обучения для уточнения *моделей объектов мониторинга, используемых при формировании логико-вероятностного вывода на основе формулы полной вероятности Байеса*, также основывается на учете статистических закономерностей в данных результатов наблюдения объектов мониторинга.

Результаты статистической обработки данных определяют возможность уточнения $P(x_i/s_j)$ условных вероятностей проявления x_i значения признака при нахождении объекта мониторинга в s_j состоянии. Такие значения формируют множество априорно заданных параметров для идентификации состояний объектов на основе формулы полной вероятности Байеса [9].

Схема реализации машинного обучения для уточнения моделей объектов мониторинга, используемых при формировании логико-вероятностного вывода на основе формулы полной вероятности Байеса, представлена на рис. 3.

Формализованное выражение, определяющее значение $P(s_j/x_i)$ – вероятности нахождения объекта в s_j -м состоянии на основе представленных $X_{\langle L \rangle}$ исходных данных, может быть описано в виде

$$P(s_j/x_i) = f_{\text{ЛВ}}(X_{\langle L \rangle}, A_{\langle L \rangle}), \quad (2)$$

где в $A_{\langle L \rangle}$ – параметры модели объекта, заданные текущими значениями $P(x_i/s_j)$ – условной вероятности проявления x_i значения признака при нахождении объекта в s_j -м состоянии.

Поскольку в соответствии с предложенными моделями количество состояний q -го объекта мониторинга ограничено (он может находиться в s_j -х состояниях, $j = 1(1)J$) и результат идентификации данных состояний может быть оценен на основе P_{s_j} вероятности нахождения объекта в каждом из возможных состояний, то результат реализации методов идентификации может быть представлен в единой форме. Так, результат идентификации состояния q -го объекта мониторинга на основе $X_{\langle L \rangle}$ значений исходных данных, может быть представлен в виде $\left\{ \left\langle s_j, P_{s_j} \right\rangle \right\}$ – множества возможных состояний объекта мониторинга и соответствующих им вероятностей.

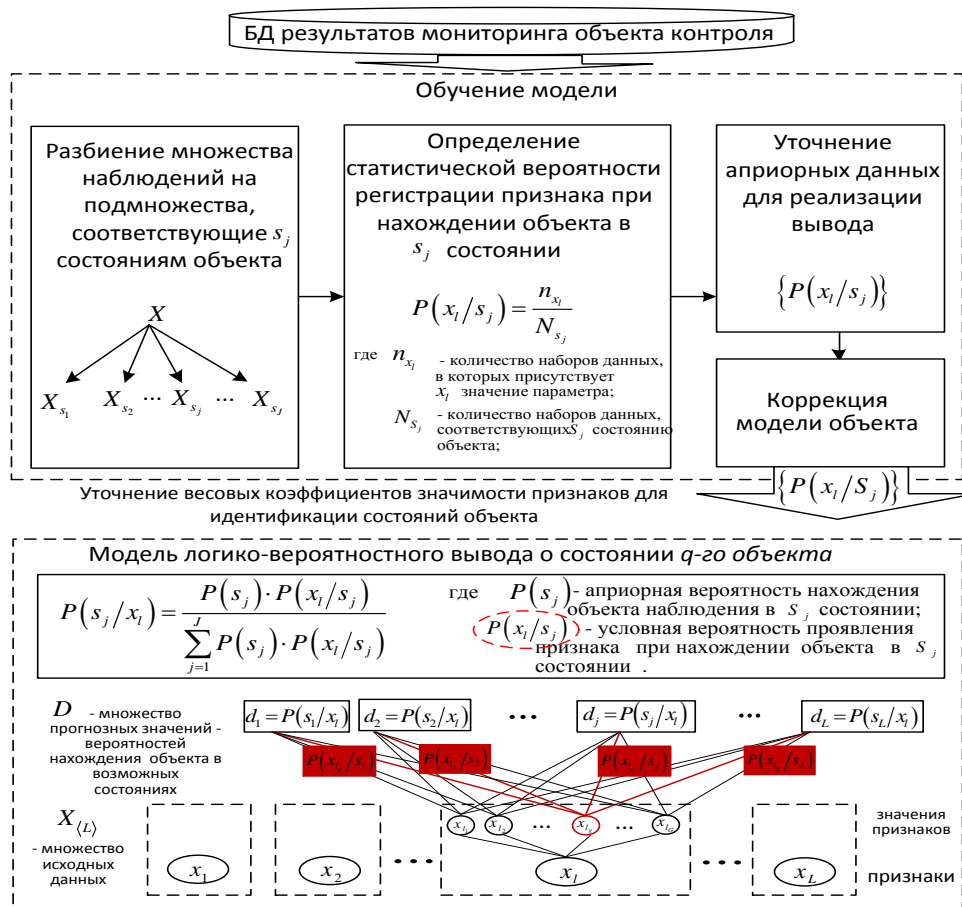


Рис. 3. Схема реализации машинного обучения для уточнения моделей объектов мониторинга используемых при формировании логико-вероятностного вывода на основе формулы полной вероятности Байеса

Единство формы представления результатов идентификации состояния объекта, с использованием различных методов, определяет возможности связанные с их комплексным использованием в интересах повышения достоверности ИАР.

ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА АГРЕГИРОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ НЕРАВНОТОЧНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ СОСТОЯНИЙ ОБЪЕКТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ НА ОСНОВЕ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Результаты идентификации возможных состояний q объекта мониторинга, оцененных в виде $P_{s_j,r}$ – вероятности нахождения объекта в s_j состояниях, полученных с использованием r -х методов ($r = 1(1)R$) будут различны, поскольку их значение определяется случайными ситуационными условиями ведения ИАР (связанными с объемом и репрезентативностью обучающей выборки, используемой для формирования модели объекта, а также с текущей полнотой и достоверностью исходных данных для решения задачи распознавания).

Комплексный учет результатов неравноточной идентификации состояний объектов, полученных с использованием R методов, формирует условия для получения уточненного – агрегированного значения D_j меры уверенности в достоверной идентификации возможных

s_j -х состояний объекта мониторинга (далее по тексту – достоверность). Агрегирование результатов неравноточной идентификации направлено на компенсацию ошибок, присущих отдельным методам.

Учет значения меры доверия результатам, полученным с использованием отдельных методов, при формировании агрегированного вывода, основывается на расчете соответствующих k_r коэффициентов доверия. В качестве базы для количественной оценки коэффициента доверия к результатам реализации r -го метода предлагается использовать P_r – статистическую вероятность правильного распознавания состояния объекта, рассчитанную на основе тестовой выборки данных, оценивание которой осуществляется на третьем этапе реализации процесса машинного обучения (см. рис. 1 – этап «оценивание»).

Нормированное значение P_r статистической вероятности правильного распознавания состояния объекта на основе r -го метода определяет значение k_r коэффициента доверия, с которым его результат учитывается при формировании обобщенного значения D_j достоверности идентификации каждого из возможных состояний объекта мониторинга, с использованием нескольких методов.

Формализованное выражение для расчета коэффициента доверия может быть представлено в следующем виде:

$$k_r = \frac{P_r}{\sum_{r=1}^R P_r}, k_r \in [0,1]. \quad (3)$$

Так, чем больше значение статистической вероятности правильного распознавания состояния объекта мониторинга с применением метода, тем с большим весом необходимо учитывать полученный с его использованием результат при формировании обобщенного вывода о состоянии объекта.

Уточненное значение достоверности состояния объекта мониторинга, рассчитанное по результатам комплексного применения нескольких методов идентификации, представлено следующим выражением:

$$D_j = \sum_{r=1}^R k_r P_{s_j,r}, \quad D_j \in [0, R], \quad (4)$$

где D_j – уточненное значение достоверности текущего s_j состояния, q -го объекта мониторинга на основе комплексного использования R методов идентификации;

k_r – весовой коэффициент значимости результатов, полученных с использованием r -го метода идентификации;

$P_{s_j,r}$ – вероятности нахождения объекта в s_j состоянии, полученные с применением r -го метода идентификации.

Обобщенная схема способа комплексирования результатов неравноточной идентификации состояний объектов мониторинга представлена на рис. 4.

Рассчитанное на основе комплексного применения методов идентификации $\{D_j\}$ множество значений достоверности возможных s_j состояний q -го объекта мониторинга, формируют новые исходные данные для принятия решения о его текущем состоянии. Выражение, определяющее содержание принимаемого решения, может быть формализовано в следующем виде:

$$s_j : j = \arg \max_{j=1(1)J} D_j. \quad (5)$$

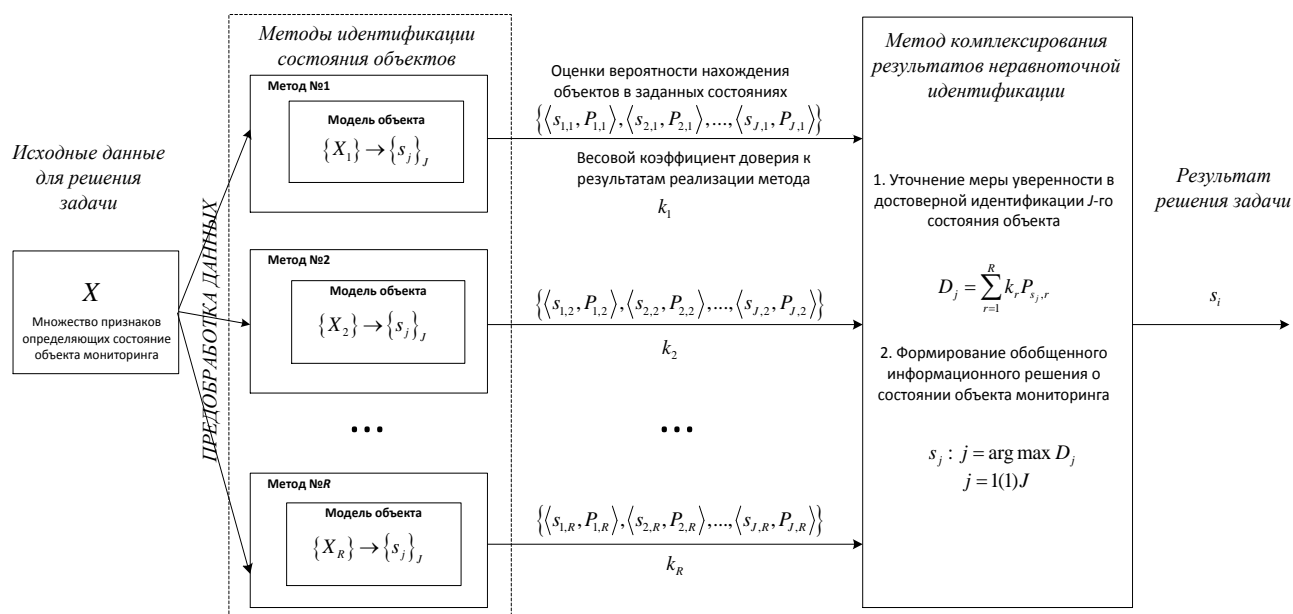


Рис. 4. Схема способа комплексирования результатов неравноточного распознавания состояний объектов мониторинга

Обобщенное решение о состоянии объекта мониторинга принимается в соответствии с максимальным значением достоверности распознанных состояний.

Апробация предложенного способа комплексирования результатов неравноточной идентификации состояний объектов мониторинга реализовывалась на основе решения задачи дистанционного экологического мониторинга состояния объектов промышленности иностранных государств по данным космического дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

Целью проведенной серии экспериментов являлось оценивание результативности использования предложенного способа комплексирования результатов неравноточной идентификации по отношению к результатам, полученным с раздельным использованием методов.

При проведении экспериментов использовались отчеты по результатам экологического мониторинга десяти объектов промышленности, на которых были выявлены нештатные и аварийные ситуации, определившие нарушения экологической обстановки.

На основе исследуемых отчетов, общий объем которых составил 1000 ед., сформирована выборка данных. Нарушения экологической обстановки фиксировались на основе замеров 26 параметров ДЗЗ. Множество состояний объектов мониторинга включало три состояния: s_1 – «функционирование объекта, без нарушения экологических норм», s_2 – «функционирование объекта с нарушениями, определяющими угрозу экологии», s_3 – «аварийное функционирование объекта, определяющего угрозу экологической безопасности».

Полученные данные были разделены на два подмножества в следующем соотношении: 80% – данные для обучения, 20% – данные для тестирования качества методов идентификации. Использование сформированных подмножеств данных обеспечило реализацию описанных в статье методов машинного обучения для формирования моделей объектов мониторинга.

Для оценивания результативности рассматриваемых методов идентификации при проведении имитационного эксперимента использовалась размеченная выборка неполных исходных данных, состоящая из 300 примеров. Неполнота исходных данных в примерах случайным образом варьировалась от 10–30%. По результатам решения задачи идентификации состояний объектов, для всей выборки данных с использованием каждого из методов,

осуществлялось оценивание m_r доли достоверно идентифицированных состояний объектов мониторинга. После этого вновь повторялась процедура «ослучаивания» неполноты в исходных данных для реализации метода. Общее количество повторений реализации расчетов на новых (измененных) исходных данных составило 100 ед. В качестве обобщенного результата результативности реализации метода идентификации использовалось модальное значение $M_r^{(мод)}$, соответствующее наиболее вероятному значению доли достоверно идентифицированных состояний объектов мониторинга.

Результаты серии имитационных экспериментов по оцениванию качества предложенных методов идентификации состояний объектов мониторинга представлены на рис. 5.

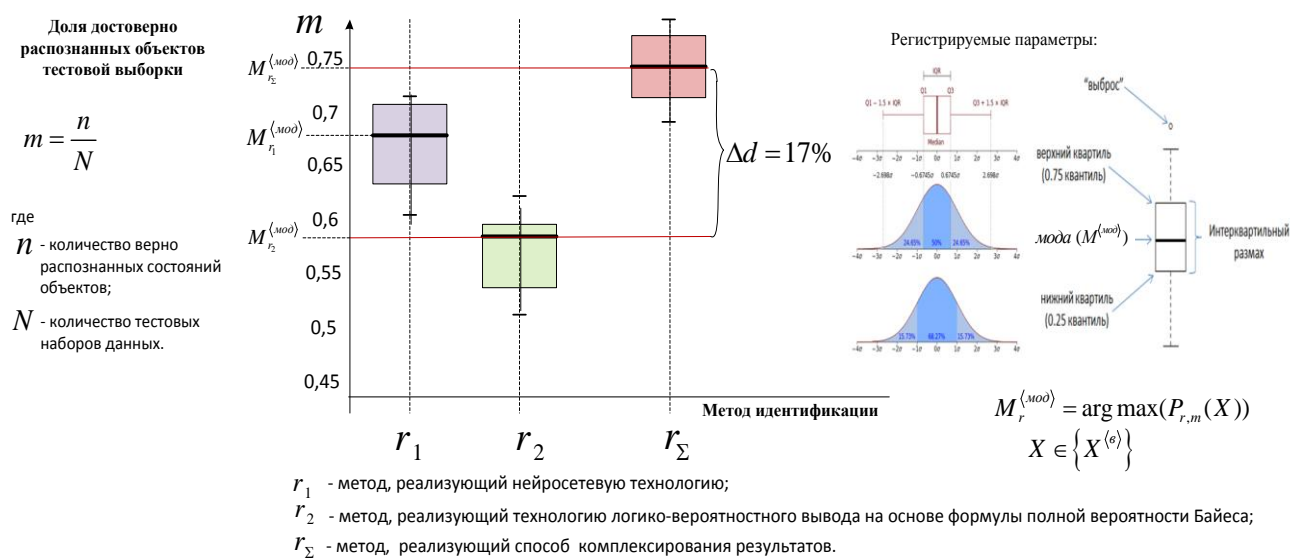


Рис. 5. Результаты имитационных экспериментов по оцениванию качества методов идентификации состояний объектов мониторинга

Особое внимание следует обратить на то, что полученные результаты не в полной мере позволяют оценить общую результативность реализации рассмотренных методов при решении подобных задач классификации. Полученные результаты в значительной степени определены качеством исходных данных для решаемой задачи. Вместе с тем, на примере рассмотренной задачи, они наглядно демонстрируют преимущества реализации подхода, связанного с комплексированием результатов неравноточной идентификации состояний объектов мониторинга.

Результаты апробации предложенного гибридного метода, основанного на комплексировании результатов неравноточной идентификации состояний, обеспечили 7–17% повышение доли верно идентифицированных состояний объектов мониторинга по отношению к результатам реализации отдельных методов. Полученные результаты свидетельствуют о практической значимости описанного способа в интересах совершенствования ИАР в органах государственного и военного управления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эффективная реализация осуществляемых в настоящее время преобразований системы информационного обеспечения органов военного управления в значительной степени связа-

на с совершенствованием процессов информационно-аналитической работы. Объективная потребность в своевременном решении задач достоверного определения состояний объектов мониторинга в условиях неполноты исходных данных определяет необходимость разработки новых подходов комплексной обработке исходных данных.

Описанные в статье концептуальный подход к реализации методов машинного обучения в интересах обеспечения требуемой оперативности актуализации знаний о функционировании объектов мониторинга и предложенный способ агрегирования результатов неравноточной идентификации состояний объектов позволяют открыть качественно новые возможности ведения ИАР. Автоматизация процессов разработки и актуализации моделей объектов мониторинга определяет условия для существенного расширения признакового пространства, учитываемого при ведении ИАР, а предложенный способ агрегирования результатов неравноточной идентификации состояний объектов, обеспечивает возможность получения более достоверных оценок состояний объектов мониторинга. Результаты проведенных имитационных экспериментов демонстрируют их практическую реализуемость и значимость для повышения результативности ИАР.

Список используемых источников

1. *Замятин А.В.* Интеллектуальный анализ данных: учеб. пособие. – Томск: Издательский дом Томского гос. ун-та, 2016. – 120 с.
2. *Смолин Д.В.* Введение в искусственный интеллект: конспект лекций / Д.В. Смолин; под общ. ред. Е.Н. Глебова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 208 с.
3. *Крамник И.* Национальный центр управления обороной – цифровая военная машина // Официальный сайт информационного агентства «Оружие России: arm-expro.ru, дата опубликования: 07.01.2020 г.
4. *Воронина В.В.* Теория и практика машинного обучения: учеб. пособие / В.В. Воронина и [др.]. – Ульяновск: УлГТУ, 2017. – 290 с.
5. *Петухов Г.Б., Якунин В.И.* Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремленных систем. – М.: АСТ, 2006. – 504 с.
6. *Николенко С., Кадурич А., Архангельская Е.* Глубокое обучение. Погружение в мир нейронных сетей. – СПб.: Питер, 2018. – 480 с.
7. *Хижняков Ю.Н.* Алгоритмы нечеткого, нейронного и нейронечеткого управления в системах реального времени: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2013. – 160 с.
8. Функция Softmax, выходы нейросети как вероятности и ансамблевые классификации. – URL: www.machinelearningmastery.ru (дата обращения: 13.11.2017).
9. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей: учеб. для вузов. – 10-е изд. – М.: Высш. шк., 2006. – 567 с.
10. *Ясницкий Л.Н.* Искусственный интеллект: учеб. пособие. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. – 197 с.

Е.А. Дудин,
кандидат технических наук, доцент;
В.В. Зайцев,
кандидат технических наук;
В.В. Рожков

ПРОЦЕДУРА ПОСТРОЕНИЯ НОРМАЛЕЙ К ГРАНИЦЕ ПЛОЩАДНОГО ОБЪЕКТА ПО БИНАРНОМУ РАСТРОВОМУ ИЗОБРАЖЕНИЮ

В статье представлены результаты разработки математического аппарата построения нормалей к границе площадного объекта, необходимого для решения задачи анализа границ площадных объектов, в частности, по данным дистанционного зондирования Земли. В качестве исходных данных используется бинарное изображение площадных объектов, полученное в результате математического моделирования или съемки площадных объектов, расположенных на земной поверхности. Математический аппарат построения нормалей к границе площадного объекта включает процедуры морфологической обработки бинарных изображений, составления уравнения кривой по координатам точек с использованием полиномов Лагранжа, построения нормали к параметрически заданной кривой в заданной точке. Представлены результаты экспериментального исследования разработанного математического аппарата построения нормалей к границе площадного объекта.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, площадной объект, граница объекта на изображении, морфологическая обработка бинарных изображений, параметрическая форма записи кривых, полином Лагранжа.

ВВЕДЕНИЕ

Современные геоинформационные системы (ГИС) реализуют многочисленные методы обработки и представления пространственной информации, позволяющие решать задачи пространственного анализа исследуемых объектов. С использованием ГИС выявляются взаимосвязи и пространственные отношения между объектами, поддерживаются многопользовательские технологии обработки данных и их интеграция в единый информационный массив.

Наличие развитых функций пространственного анализа является одним из главных и определяющих показателей качества ГИС. К таким функциям относятся как операции в виде простых запросов, так и сложное оценивание на основе пространственного моделирования. В общем случае пространственный анализ проводится с целью решения следующих задач:

- выявления закономерностей в расположении или структуре пространственных объектов;
- определение тенденций развития явления в пространстве и времени;
- определение взаимосвязей между пространственными объектами;
- выбор решения с учетом поставленных условий и ограничений;
- определение заданных характеристик объектов.

Существенная доля задач по обработке геопро пространственных данных решается с использованием процедур анализа площадных объектов. При этом граница реальных объектов может изменяться в течение времени, а описывающие ее пространственные данные формируются с ограниченной точностью. В силу этого при сопоставлении пространственных данных, полученных из разных источников, наблюдается несовпадение границ соответствующих друг другу площадных объектов. В таком случае для обеспечения корректности обработки и представления пространственных данных требуется выполнять коррекцию границы площадного объекта к определенному состоянию. Например, в работе [1] рассмотрен подход к получению массива распределения теневых участков на изображении земной поверхности, получаемом путем оптико-электронной съемки местности. В результате приме-

нения предлагаемого алгоритма реальная граница изображения теней не соответствует границе на получаемом бинарном изображении. Это связано с дискретностью используемой цифровой модели рельефа (ЦМР), а также с инструментальными и случайными ошибками определения значений высоты при ее построении. Названные ошибки при моделировании могут оказывать влияние на получаемые в результате изображения теней от рельефа местности. В связи с этим возникает необходимость уточнения границ теневых участков для решения задачи дальнейшей топографической коррекции материалов космической съемки.

Общий подход к уточнению границ можно рассматривать как поиск резкого перепада яркости между соседними пикселями изображения вдоль смоделированной границы в окрестности, соответствующей размеру ошибки [2]. На рис. 1 показан пример отображения смоделированных теневых участков на космическом снимке. При этом темные участки вдоль границы зон освещенности соответствуют случаю, когда смоделированная тень истощена, а ярко-зеленые – когда избыточна.

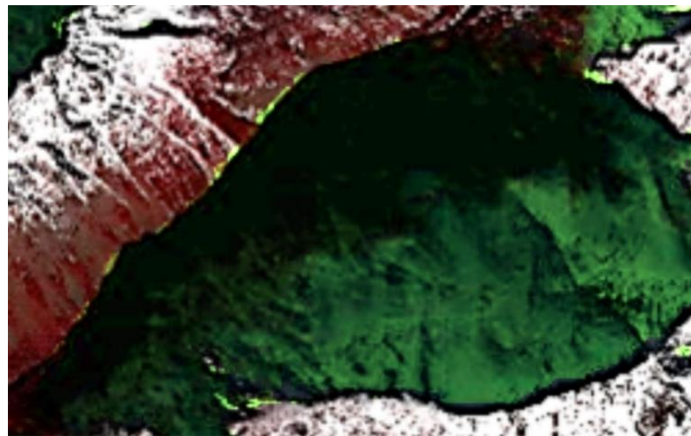


Рис. 1. Реальное оптико-электронное изображение с наложением смоделированных теней от рельефа местности

Логично предположить, что уточнение местоположения границы тени на модельном изображении теневых участков должно осуществляться вдоль линии теневой области на реальном космическом снимке. Графическая иллюстрация поиска реальной границы зон освещенности представлена на рис. 2.

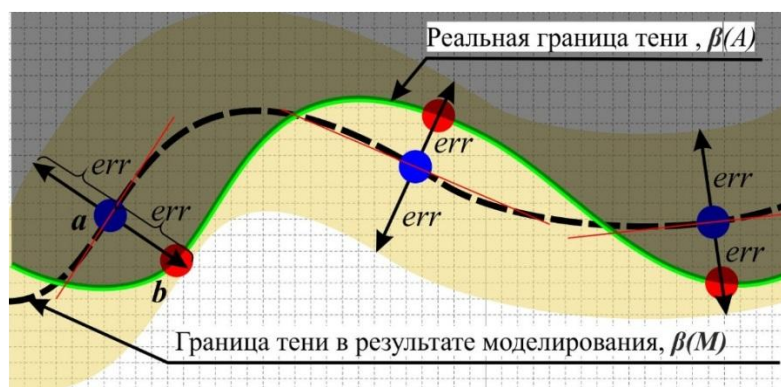


Рис. 2. Схема уточнения границы зон с разным освещением

Сформированное в ходе моделирования двоичное изображение является двумерным целочисленным множеством Z^2 , к которому применимы все правила теории множеств и математической морфологии. При моделировании районированного по освещенности объекта наблюдения формируется изображение тени – множество M с границей $\beta(M)$. Реальная тень,

формируемая при оптико-электронной съемке средствами дистанционного зондирования – множество A с границей $\beta(A)$.

Как видно из рис. 2, поиск истинного расположения границы тени, полученной в результате моделирования, необходимо производить в направлении, перпендикулярном линии реальной границы тени, расположенной непосредственно на космическом снимке. Для решения указанной задачи предлагается применять математический аппарат морфологической обработки бинарных изображений, а также параметрическую форму записи кривых с использованием полиномов Лагранжа.

ОБОБЩЕННОЕ СОДЕРЖАНИЕ ПРОЦЕДУРЫ ПОСТРОЕНИЯ НОРМАЛЕЙ К ЛИНИИ ГРАНИЦЫ ПЛОЩАДНОГО ОБЪЕКТА НА ИЗОБРАЖЕНИИ

Алгоритм построения нормали к границе площадного объекта на изображении можно представить в виде последовательного выполнения следующих действий.

1. Пороговая обработка полутонового изображения и формирование бинарного массива площадных объектов на исходном изображении. Методы бинаризации делятся на две группы по принципу построения пороговой поверхности: методы глобальной и локальной бинаризации. Пороговой поверхностью является матрица размерностью $M \times N$, соответствующей размерности исходного изображения. При этом каждая ячейка матрицы задает порог яркости бинаризации для соответствующего пикселя на исходном изображении. В методах глобальной бинаризации пороговая поверхность является плоскостью с постоянным значением пороговой яркости, а в методах локальной бинаризации значение пороговой яркости меняется от точки к точке изображения и рассчитывается на основе некоторых локальных признаков в окрестности пикселя.

2. Морфологическая обработка бинарного массива [3]. Процедуры морфологической обработки строятся на двух базовых операциях – морфологической дилатации и эрозии. В зависимости от комбинации базовых операций продуцируются более сложные алгоритмы морфологической обработки, позволяющие решать задачи выделения границ объектов, поиска выпуклых оболочек и остовов областей, расчета геометрических характеристик объектов на изображении и т. д. В рамках решаемой задачи методы морфологической обработки могут быть использованы для фильтрации мелких объектов (шумов) на бинарном изображении, для выделения границ площадных объектов, а также для поиска и обработки внутренних областей площадных объектов.

3. Формирование границ (замкнутых контуров) областей затененных участков бинарного изображения. Для решения задачи построения кривой, проходящей через множество точек линии границы, могут быть использованы методы интерполяции, а также аппроксимации данных. С математической точки зрения задачи интерполирования, вероятно, решать легче. Однако при решении многих прикладных задач аппроксимация оказывается более практичной, так как точные значения обрабатываемых данных искажаются из-за наличия шума. Компромиссным решением при выборе одного из этих методов могут стать выделение множества точек-ориентиров, которые могут быть определены пользователем в интерактивном режиме, и проведение кривой вблизи этих точек.

4. Построение нормалей к элементам границы площадного объекта. Задача построения нормали к кривой в заданной точке решается путем построения линии, перпендикулярной к касательной к кривой в данной точке.

Рассмотрим подробнее реализацию отдельных этапов процедуры построения нормалей к границам площадных объектов.

МОРФОЛОГИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЯ

В рамках решения задачи поиска границ объектов на бинаризованном изображении, а также обработки внутренних областей площадных объектов процедуры морфологической обработки применяются следующим образом.

1. Выделение смежных пикселей и формирование связных множеств (областей) R_k , $k \in [1, K]$ затененных участков на бинарном изображении M .

Объединение K областей R_k формирует информативную область R_u бинарного изображения (в нашем случае эквивалентна M), а ее дополнение $(R_u)^c$ – фон (рис. 3).

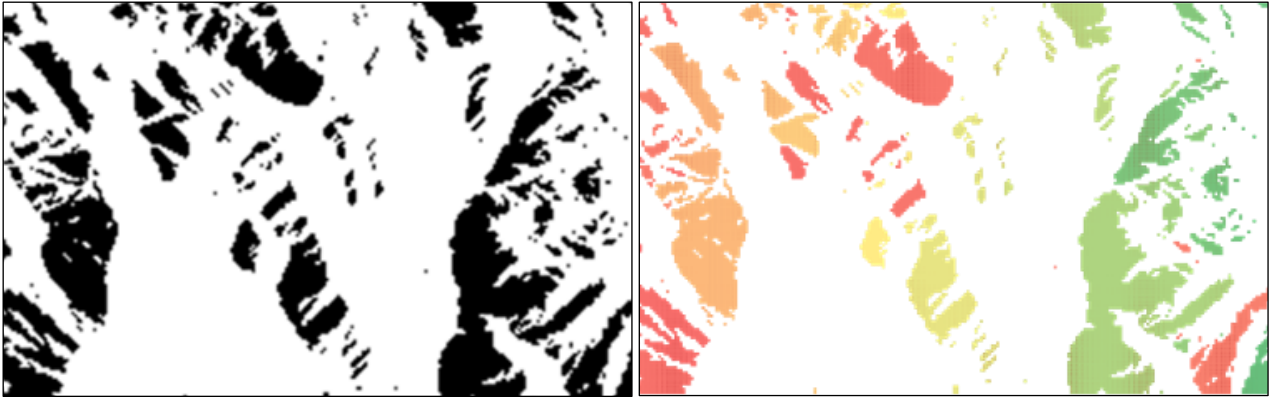


Рис. 3. Пример бинарного изображения теней от рельефа местности с несвязными областями (слева – черные) и связными (справа – каждая область выделена определенным цветом для демонстрации связности)

2. Формирование границ (замкнутых контуров) областей затененных участков бинарного изображения $\beta(M)$ и расчет дискретных путей, однозначно описывающих каждый контур связных областей R_k .

Граница каждой связной области R_k может быть выделена путем выполнения операций эрозии R_k по B (множество-примитив размером 3×3 со всеми единичными значениями) и вычисления разности между R_k и результатом эрозии [3]:

$$\beta(R_k) = R_k \setminus (R_k \ominus B), \text{ где } B = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

3. Анализ внутренних областей площадных объектов на изображении.

Следует учитывать наличие не только внешних границ областей, но и присутствие на изображении границ так называемых «дырок», которые формируются из-за наличия освещенных участков, окруженных тенями. Для расчета границ «дырок» воспользуемся математическим аппаратом морфологической реконструкции через дилатацию изображения-маркера F по изображению-маске G до получения стабильного результата:

$$R_G^D(F) = D_G^1 \left[D_G^{k-1}(F) \right], \text{ где } D_G^1(F) = (F \oplus B) \cap G. \quad (2)$$

Если $I(x, y)$ – исходное двоичное изображение, то F – изображение-маркер, которое формируется по следующему правилу:

$$F(x, y) = \begin{cases} 1 - I(x, y) & , \text{ если } (\cdot)(x, y) \in \text{краю } I, \\ 0 & \text{ в остальных случаях.} \end{cases} \quad (3)$$

Изображение-маска G является дополнением I , т. е. $G = I^c$, тогда изображение с заполненными «дырками» рассчитывается по формуле

$$H = \left[R_{I^c}^D(F) \right]^c \quad (4)$$

В результате искомое множество элементов «дырок» – $H \cap I^c$. Этапы процедуры морфологического выделения «дырок» на бинарном изображении представлены на рис. 4.

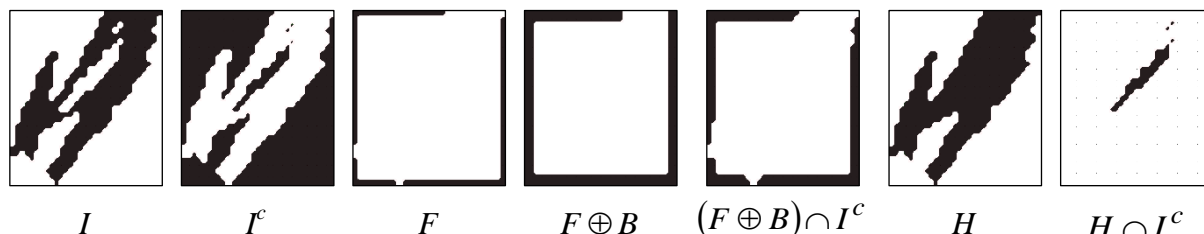


Рис. 4. Графическое представление морфологического выделения «дырок» на примере реальной связной области

Формирование дискретных путей, описывающих границы связных областей, в данном исследовании осуществлялось методом трассировки окрестностей Мура [4].

ОПЕРАЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ НОРМАЛИ К ЭЛЕМЕНТУ ГРАНИЦЫ ОБЪЕКТА

На следующем этапе обработки осуществляется выбор элемента границы для уточнения принадлежности к линии границы элемента $a \in \beta(M)$ и построение нормали в этой точке, которая определяет элементы множества S для анализа на принадлежность к множеству A . Элементы множества S – это значения яркостей соответствующих пикселей оптоэлектронного изображения $I(x, y)$. В этом случае $S = \{I(x_1, y_1), I(x_2, y_2), \dots, I(x_n, y_n)\}$.

Уравнение нормали имеет вид [5]

$$y - y_0 = -\frac{1}{f'(x_0)}(x - x_0), \quad y_0 = f(x_0). \quad (5)$$

Функция $y = f(x)$ описывает границу изображения теней от рельефа местности. Для задания функции по известным точкам, воспользуемся интерполяционным многочленом Лагранжа [6], который в общем виде можно представить как

$$L(x) = \sum_{i=0}^n f(x_i) \cdot l_i(x), \quad (6)$$

где n – степень полинома $L(x)$;

$f(x_i)$ – значение интерполирующей функции $f(x)$ в точке x_i ;

$l_i(x)$ – базисные полиномы (множитель Лагранжа), которые определяются по формуле

$$l_i(x) = \prod_{j=0, j \neq i}^n \frac{x - x_j}{x_i - x_j} = \frac{x - x_0}{x_i - x_0} \dots \frac{x - x_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} \cdot \frac{x - x_{i+1}}{x_i - x_{i+1}} \dots \frac{x - x_n}{x_i - x_n}. \quad (7)$$

Таким образом, для определения нормали в точке $S[i] = I(x_1, f(x_1))$ необходимо реализовать многочлен Лагранжа по трем точкам $[I(x_0, f(x_0)), I(x_1, f(x_1)), I(x_2, f(x_2))]$, который может быть представлен в виде

$$L(x) = f(x_0) \frac{(x - x_1)(x - x_2)}{(x_0 - x_1)(x_0 - x_2)} + f(x_1) \frac{(x - x_0)(x - x_2)}{(x_1 - x_0)(x_1 - x_2)} + f(x_2) \frac{(x - x_0)(x - x_1)}{(x_2 - x_0)(x_2 - x_1)}. \quad (8)$$

Функция $L(x)$ имеет вид

$$L(x) = ax^2 + bx + c, \quad (9)$$

$$\text{где } a = \frac{(f(x_2) - f(x_0))(x_1 - x_0) - (f(x_1) - f(x_0))(x_2 - x_0)}{(x_2^2 - x_0^2)(x_1 - x_0) - (x_1^2 - x_0^2)(x_2 - x_0)}; \quad b = \frac{f(x_1) - f(x_0) - a(x_1^2 - x_0^2)}{x_1 - x_0},$$

$$c = f(x_0) - (ax_0^2 + bx_0).$$

Функция нормали рассчитывается для средней точки $(x_1, f(x_1))$, тогда уравнение (5) с учетом производной от функции (9) запишем в виде

$$n(x) = f(x_1) - \frac{1}{2ax_1 + b}(x - x_1) \quad (10)$$

или в виде уравнения прямой

$$n(x) = kx + m, \quad (11)$$

где постоянные k и m рассчитываются по формулам:

$$k = -\frac{1}{2ax_1 + b}; \quad m = f(x_1) + \frac{x_1}{2ax_1 + b}. \quad (12)$$

В случае, если $2ax_1 + b = 0$, то нормаль проходит через точку (x_1, y_1) и параллельна оси y .

ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ПОСТРОЕНИЮ НОРМАЛЕЙ К ГРАНИЦЕ ПЛОЩАДНОГО ОБЪЕКТА ПО РЕАЛЬНЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ

Экспериментальное исследование разработанного математического аппарата построения нормалей к границе площадного объекта проводилось на основе реальных данных космической съемки с использованием программного средства определения затененных участков с учетом рельефа местности для заданных условий оптико-электронной съемки [7]. Результат построения нормалей к точкам внешних (красным) и внутренних (синим) границ приведен на рис. 5.

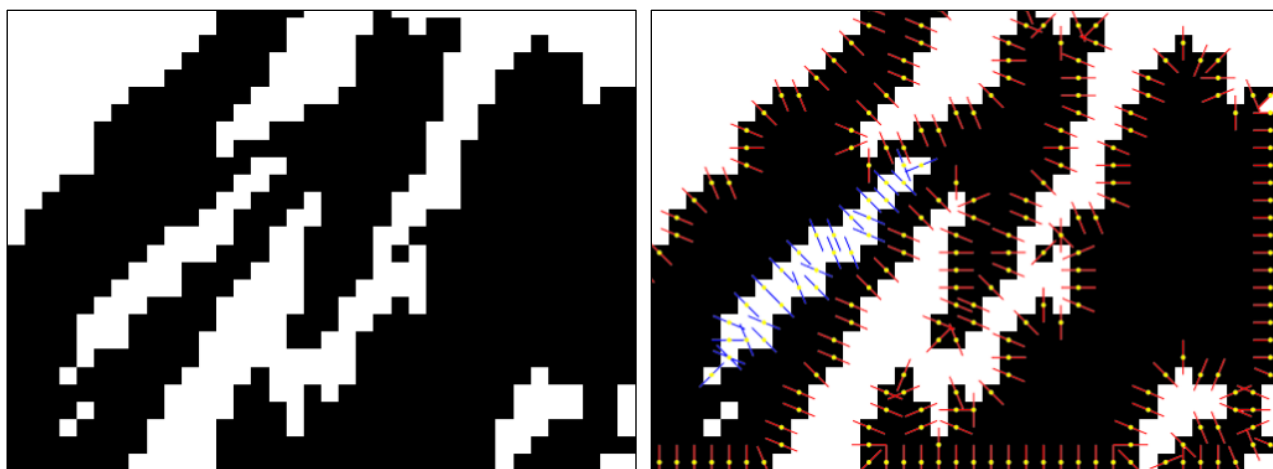


Рис. 5. Исходный бинаризованный массив и результат программной реализации построения нормалей к границам площадных объектов

По изображениям, показанным на рис. 5, можно сделать вывод о достижении поставленной цели исследований. Применение разработанного алгоритма позволяет получить изображение нормалей к границе площадного объекта по бинарному растровому изображению.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Математический аппарат построения нормалей к границе площадного объекта, рассмотренный в работе, может быть использован при решении задачи уточнения границ изображений площадных объектов, полученных средствами дистанционного зондирования Земли. Результаты экспериментальных исследований разработанного алгоритма подтверждают возможность построения нормалей в каждой точке границы площадного объекта.

Дальнейшее направление исследований будет связано с разработкой методов коррекции границ объектов векторных электронных карт по материалам космической съемки земной поверхности с использованием разработанного алгоритма построения нормалей.

Список используемых источников

1. Рожков В.В., Григорьев А.Н., Дудин Е.А., Шабakov Е.И. Методика анализа условий оптико-электронной съемки с борта беспилотного летательного аппарата в сложной топографической обстановке // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Применение беспилотных летательных аппаратов в географических исследованиях» / ответственный редактор С.А. Макаров. – 2018. – С. 99–103.
2. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2012. – 1104 с.
3. Пытьев Ю.П., Чуличков А.И. Методы морфологического анализа изображений. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 336 с.
4. Тоффоли Т., Марголуз Н. Машины клеточных автоматов: пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 280 с.
5. Кузнецов Л.А. Сборник заданий по высшей математике. Типовые расчеты: учеб. пособие. – 13-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2015. – 240 с.
6. Авхадиев Ф.Г., Губайдуллина Р.К., Насибуллин Р.Г. Учебно-методическое пособие по численным методам анализа. – Казань: Казанский (Приволжский) федеральный ун-т, 2019. – 113 с.
7. Свид. о регистрации программы для ЭВМ RU 2018614404. Программа определения затененных участков с учетом рельефа местности для заданных условий оптико-электронной съемки / Рожков В.В., Григорьев А.Н. – Заявка № 2018611799, заявл. 22.02.2018.

И.Ю. Еремеев,
доктор технических наук, профессор;
В.Н. Маковский,
кандидат технических наук, доцент;
А.Н. Смирнов

МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ ЧАСТИЧНО НАБЛЮДАЕМОЙ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ЭНТРОПИЙНОГО АНАЛИЗА ДИНАМИЧЕСКОЙ ТОПОЛОГИИ

В статье рассматривается проблема идентификации состояния частично наблюдаемой телекоммуникационной инфраструктуры в информационном поле представления дискретных систем с динамической топологией в пространстве наблюдаемых параметров.

Ключевые слова: телекоммуникационная инфраструктура, система связи с динамической топологией сети, идентификация.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время активно развиваются научные направления разработки единой методологии исследования сетей различной природы. Под сетями различной природы понимаются: сети взаимодействия белков в живых организмах, сети цитирования, информационно-коммуникационные сети, социальные сети и др. Мощным инструментом исследований в этой области является моделирование сетей с использованием положений теории случайных графов [1, 2]. Однако, несмотря на развитие вычислительных мощностей ЭВМ, появление языков высокого уровня и специального программного обеспечения, применение этого аппарата весьма ресурсозатратно.

Альтернативным подходом к анализу таких сетей является применение аппарата на основе энтропийного анализа, обеспечивающего описание явлений образования и эволюции организованных и стохастических компонентов в динамической топологии исследуемых сетей [5].

Современные телекоммуникационные инфраструктуры с динамической топологией (ТИДТ), обеспечивающие оперативный обмен мультимедийной информацией, находят применение на объектах различного назначения (промышленных, военных и др.). Их особенность состоит в использовании подвижных узлов связи – точек радиодоступа (ТРД) [3].

Интерес представляет ситуация, когда наблюдаемая телекоммуникационная инфраструктура защищена от несанкционированного доступа к служебной информации, раскрывающей состав, структуру, особенности функционирования, направления эволюции или деградации сети. В этом случае наблюдаемы только физические параметры, проявляющиеся в процессе функционирования ТРД исследуемой сети. К таким параметрам можно отнести: координаты пространственного положения ТРД и физические параметры радиоизлучений, такие как несущая частота, мощность сигнала, длительность частотной посылки и т. д. В силу этого возникает необходимость разработки новых подходов к решению задачи идентификации частично наблюдаемой ТИДТ с целью выявления изменения состояния в условиях априорной неопределенности о параметрах ее функционирования. Причем под термином динамическая топология понимается взаимное расположение и связи между элементами сети не только в пространстве географических координат, но и в более широком смысле – в пространстве наблюдаемых параметров.

ФОРМАЛИЗОВАННАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Формальная постановка задачи может быть осуществлена следующим образом. Есть набор данных $\{Y_k^n(t_j)\}$ в виде результатов наблюдения q параметров M элементов в составе ТИДТ за некоторое время T , где k – номер параметра наблюдаемого объекта, $k = \overline{1, q}$; n – номер объекта, $n = \overline{1, M}$; j – номер временного интервала, $j = \overline{1, J}$. По набору наблюдений $\{Y_k^n(t_j)\}$ необходимо осуществить распознавание состояния ДС $\Omega_k \in \Omega^{(2)}$ в условиях априорной неопределенности о значениях параметров функционирования элементов системы $\{X^{(n)}(t_j)\}$.

Для разработки метода идентификации частично наблюдаемой телекоммуникационной инфраструктуры с динамической топологией необходимо:

- 1) перечислить все возможные состояния для данной динамической модели, т. е. задать множество возможных состояний объекта $E = \{R_{\langle q \rangle}^j\}$, где q – число наблюдаемых параметров в j момент времени;
- 2) задать множество наблюдаемых (регистрируемых) параметров функционирования объекта $R_{\langle q \rangle}^j$, где q – число наблюдаемых параметров в j момент времени;
- 3) указать, какие комбинации наблюдаемых характеристик будут соответствовать типовым состояниям объекта.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ С ДИНАМИЧЕСКОЙ ТОПОЛОГИЕЙ

Теоретическую основу разрабатываемого метода идентификации частично наблюдаемой телекоммуникационной инфраструктуры с динамической топологией составляет подход к оцениванию состояния организованности дискретной системы на основе энтропийного анализа [4, 5]. Суть подхода заключается в переносе регистрируемых в процессе наблюдения параметров функционирования компонентов динамических систем различной природы в единое метрическое информационное пространство. Уровень упорядоченности (организованности) системы определяется степенью отклонения ее от максимально неупорядоченного состояния, и его оценивают через показатель организованности R [3], который вычисляют по формуле

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{m_i}{M_A} \log_2(m_i + \frac{1}{N})}{\log_2(M_A + 1)}. \quad (1)$$

- где M_A – общее число элементов в составе системы A ;
 N – число частей системы, на которое ее можно условно разделить по одному из наблюдаемых параметров функционирования элементов;
 m_i – количество элементов в i -части.

Для удобства расчетов и улучшения наглядности представления результатов допускается использовать величину, обратную R – энтропийный показатель организованности R_S , который определяется выражением

$$R_s = \frac{-\sum_{i=1}^N \frac{m_i}{M_A} \log_2 \left(\frac{m_i}{M_A} \right)}{\log_2 (M_A + 1)}. \quad (2)$$

Показатели R и R_s по отношению друг к другу выступают в качестве взаимодополняющих противоположностей и характеризуют отражение дискретных систем через свои части с различных сторон, – определенности и неопределенности соответственно [5, 6].

В работах [3–5] рассмотрена подробно методология формирования функционально-геометрических и поведенческих признаков подвижных объектов на примере телекоммуникационной инфраструктуры с динамической топологией. Проведенные исследования модели ТИДТ в пространстве состояний организованности многоэлементных регулярных кластерных структур показали [5, 6], что возможные значения показателя организованности при фиксированном числе ТРД в плоскости значения несущей частоты излучения ТРД, могут лежать в пределах области, ограниченной функциями R_s^{\max} и R_s^{\min} . Каждое состояние ТИДТ может быть охарактеризовано значением показателя организованности наблюдаемой системы. Например, увеличение значения энтропийного показателя организованности R_s может свидетельствовать о признаках реорганизации системы или ее разрушения. В то же время уменьшение значения R_s свидетельствует о развитии системы, росте степени ее организованности. При этом установлено, что значения показателей организованности R и R_s , что наиболее важно, уникальны для каждого отдельно взятого состояния наблюдаемой динамической системы.

Пример моделей ТИДТ в процессе ее перехода из структурно-упорядоченного состояния в состояние хаоса по параметру «направление движения» приведен на рис. 1.

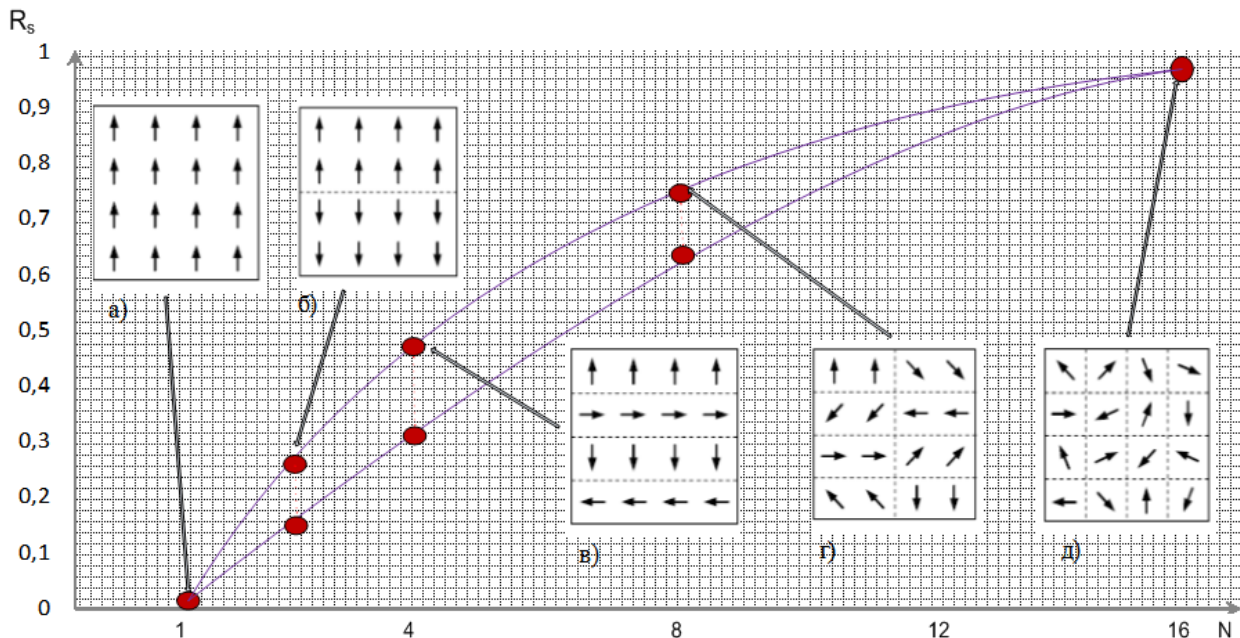


Рис. 1. Пример пространства возможных состояний системы с $M_A = 16$ при различных значениях N :
 а – $N=1$; б – $N=2$; в – $N=4$; г – $N=8$; д – $N=16$

Графическое отображение взаимосвязи изменения значения энтропийного показателя организованности в пространстве возможных состояний ТИДТ, состоящей из 10 ТРД, и изменения числа используемых системой частот показаны на рис. 2.

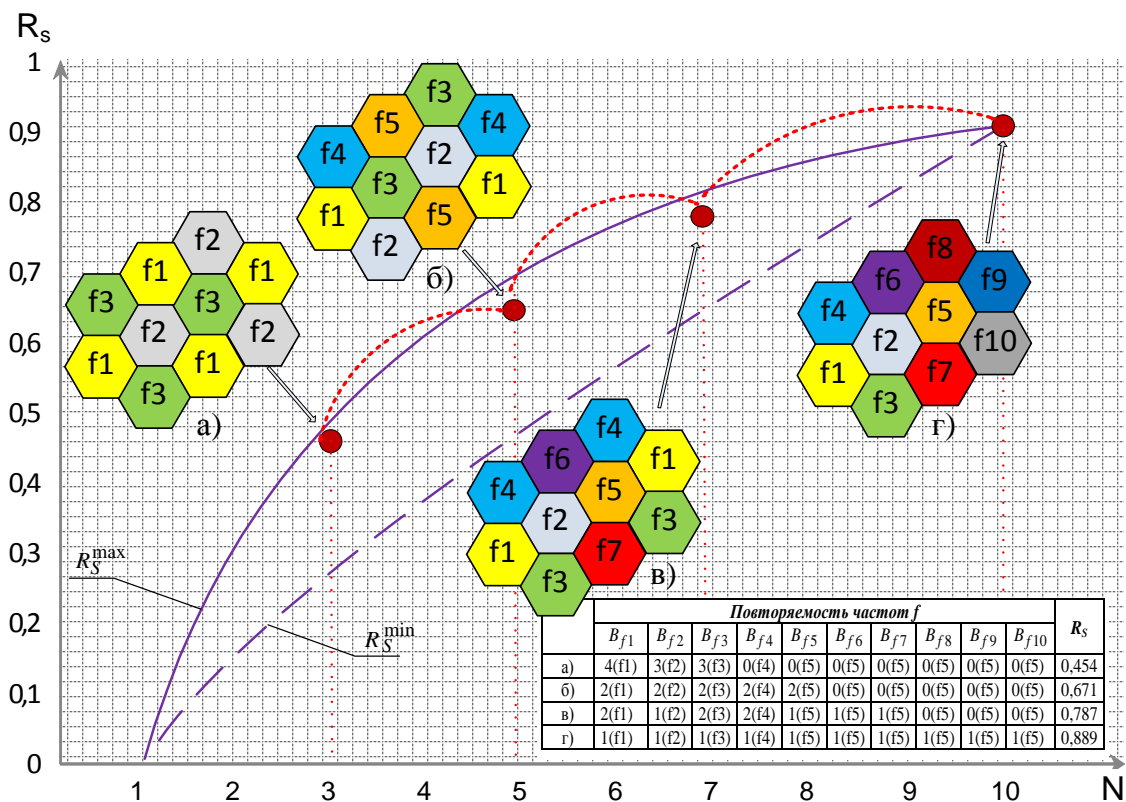


Рис. 2. Пример возможных состояний ТИДТ из 10 ТРД (M_A) в информационном поле представления дискретных систем с K частотами:
 $a - K=3$; $б - K=5$; $в - K=7$; $г - K=10$

Как видно на рис. 2, увеличение числа используемых ТИДТ частот при фиксированном числе ТРД ведет к росту значения показателя R_s , который достигает своего максимального значения, когда каждая ТРД работает на своей частоте (рис. 2,г). Очевидно, что при сокращении числа используемых ТИДТ частот и увеличении случаев повторного использования частот наблюдается уменьшение значения показателя R_s (рис. 2,а–в).

Выявленная взаимосвязь между значениями показателей организованности R и R_s , характеризующих закономерности функционирования отдельных компонентов системы на момент наблюдения и информации о ее упорядоченности, позволяет систематизировать все состояния наблюдаемой телекоммуникационной инфраструктуры с динамической топологией.

МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ ЧАСТИЧНО НАБЛЮДАЕМОЙ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ С ДИНАМИЧЕСКОЙ ТОПОЛОГИЕЙ

Указанные обстоятельства позволяют сформулировать метод идентификации состояния телекоммуникационной инфраструктуры с динамической топологией в информационном поле представления дискретных систем как последовательность этапов определенных преобразований результатов наблюдений для достижения искомого результата, выполняемых в рамках энтропийного анализа наблюдаемых параметров.

В инженерной кибернетике под идентификацией понимается процедура построения оптимальной математической модели технической системы по наблюдаемым реализациям входящих и выходящих сигналов.

В условиях, когда нет входных данных (они недоступны), идентификация состояния системы осуществляется по результатам анализа выходных данных в текущий момент времени или на некотором фиксированном интервале. Применительно к решаемой задаче под идентификацией будем понимать описание характеристики состояния системы как функции результатов наблюдения ее выходных данных.

Сущность метода идентификации частично наблюдаемой телекоммуникационной инфраструктуры с динамической топологией сводится к переходу от множества характеристик параметров элементов, регистрируемых в процессе мониторинга системы, к значениям показателей ее упорядоченности в информационном поле представления дискретной системы и формирования на их основе таблицы состояний ТИДТ, т. е. эталонных описаний состояний системы [5, 6].

На *начальном этапе* производится оценивание степени упорядоченности телекоммуникационной инфраструктуры с динамической топологией. С этой целью множество элементов ТИДТ рассматривается как сложная дискретная система (СДС) A . В качестве исходных данных для метода выступает множество мощностью M_A и набор q параметров, описывающих свойства элементов множества. Очередность выполнения процедур оценивания степени упорядоченности множества M_A и взаимосвязь основных элементов показаны на рис. 3.

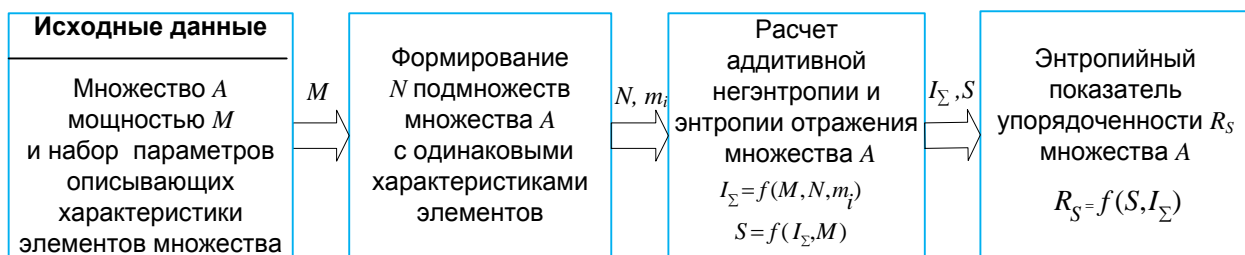


Рис. 3. Основные этапы оценивания степени упорядоченности множества элементов

Для представления множества элементов системы M_A в виде комплекта N подмножеств производится анализ системы A на основе регистрируемого в процессе наблюдения параметра ее элементов. В результате все элементы множества объединяются в N подмножеств по m_i элементов с идентичным значением регистрируемого в процессе наблюдения параметра (например: формы, цвета, частоты, направления движения и др.).

В соответствии с методикой, представленной в [4, 5], производится расчет аддитивной негэнтропии $I_\Sigma = f(M, N, m_i)$ и энтропии отражения $S = f(I_\Sigma, M)$. Далее, в соответствии с выражением (3) осуществляется расчет энтропийного показателя упорядоченности множества $R_S = f(S, I_\Sigma)$.

В результате указанных преобразований из набора оценок свойств наблюдаемых элементов множества A получим значение показателя упорядоченности для текущего состояния этого множества.

На *втором этапе* для формирования таблицы эталонных состояний наблюдаемой системы производится расчет значений энтропийного показателя упорядоченности множества ее элементов M_A для каждого из q наблюдаемых параметров элементов ДС. По результатам проведенных расчетов может быть сформирован интегральный показатель организованности наблюдаемой системы A в плоскости всех q наблюдаемых параметров элементов ДС в виде

$\{\mathfrak{R}_{<q>}^{(i)}\}$, $\mathfrak{R}_{<q>}^{(i)} = \langle R_1^{(i)}, R_2^{(i)}, \dots, R_q^{(i)} \rangle$, где i – порядковый номер момента наблюдения.

Для получения эталонных описаний динамической системы необходимо сформировать таблицу, описывающую возможные изменения состояний системы.

Процесс смены состояний принято называть движением системы. Тогда в рамках предлагаемого в работе организационного подхода множество последовательных изменений состояний системы, представленных в информационном поле, будем называть эволюционной траекторией (ЭТ) системы. Пример ЭТ ДС представлен на рис. 4.

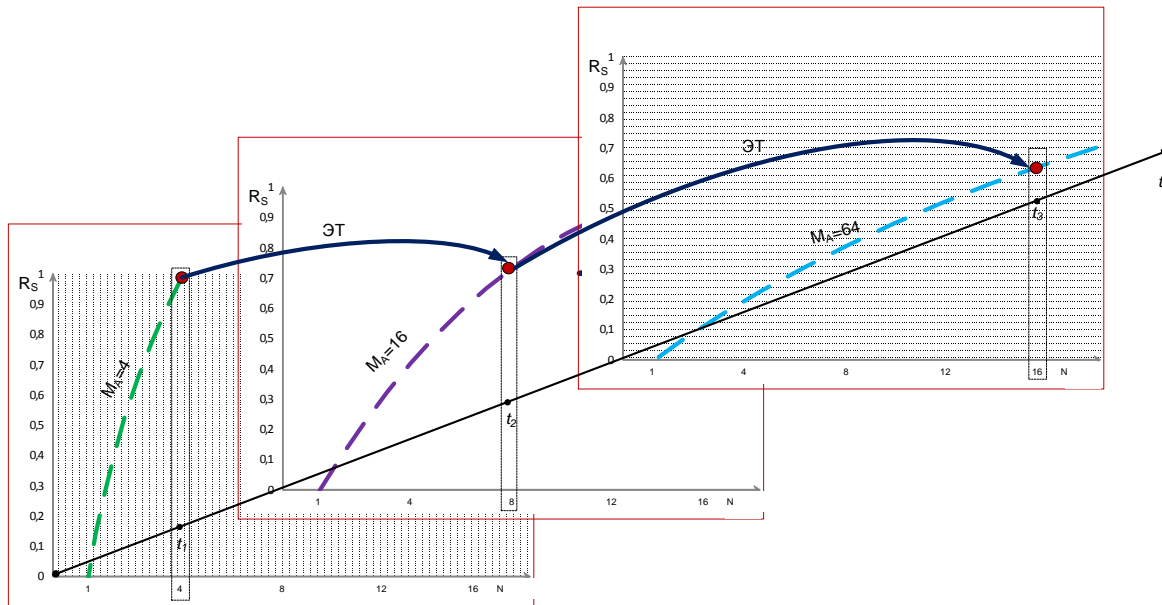


Рис. 4. Пример ЭТ СДС с учетом одного признака функционирования в моменты времени t_1, t_2, t_3

На рисунке представлена ЭТ СДС, отражающая изменение состояния системы в моменты времени t_1, t_2, t_3 по одному из наблюдаемых признаков функционирования элементов системы. Как видно из рисунка в момент времени t_1 количество элементов системы $M_A = 4$, число подмножеств, на которое делятся элементы системы в плоскости одного из параметров функционирования, $N = 4$, энтропийный показатель организованности $R_s = 1$, т. е. с позиции этого признака элементы системы не упорядочены. В момент времени t_2 количество элементов системы увеличилось до $M_A = 16$, число частей, на которые делятся элементы системы в плоскости одного из признаков функционирования, $N = 8$, при этом энтропийный показатель организованности уменьшается до $R_s = 0,734$, т. е. у элементов системы начинают появляться признаки упорядоченности.

В момент времени t_3 число элементов системы достигает $M_A = 64$, число частей, на которое делятся элементы системы в плоскости одного из признаков функционирования, $N = 16$, энтропийный показатель организованности уменьшается до $R_s = 0,62$, т. е. у наблюдаемой системы можно отметить тренд к росту организованности – к развитию системы.

Предложенный подход к построению ЭТ СДС оправдан при полной наблюдаемости системы [1, 2]. Для частично наблюдаемой телекоммуникационной инфраструктуры с динамической топологией отсутствует возможность использования типовых методов идентификации технических систем, так как отсутствует возможность контроля входных воздействий на объект наблюдения и отклика на них. Кроме того, остается неизвестным алгоритм функционирования при использовании объекта по назначению. Доступны только внешне

проявляемые выходные параметры функционирования объекта [6]. В данном случае для построения ЭТ может быть использован подход, основанный на анализе динамики наблюдаемых параметров СДС, выраженной в виде приращений значений показателя организованности наблюдаемой системы $\Delta R_{\langle q \rangle}^{(k+1)} = \langle \Delta R_1^{(k+1)}, \Delta R_2^{(k+1)}, \dots, \Delta R_q^{(k+1)} \rangle$ по всем наблюдаемым q параметрам функционирования системы.

С указанной целью на *третьем этапе* осуществляется оценка приращения показателя организованности $\Delta R_{\langle q \rangle}(t_k) = R_{\langle q \rangle}(t_k) - R_{\langle q \rangle}(t_{k-1})$ по каждому наблюдаемому из q параметров элементов ТИДТ. Закодировав приращение показателя $\{\Delta R_{\langle q \rangle}(t_k)\}$ в виде 1, а отсутствие приращения – в виде 0, производим построение траектории эволюции системы в информационном поле представления ДС в виде последовательности q -элементных двоичных комбинаций, определяющих внутреннее состояние системы, в виде $\{X_{\langle q \rangle}(t_k)\}$:

$$X_{\langle q \rangle}(t_k) = \langle x_1(t_k), x_2(t_k), \dots, x_q(t_k) \rangle, \quad x_i(t_k) = \begin{cases} 1, & \text{при } r_i(t_k) > r_i(t_{k-1}); \\ 0, & \text{при } r_i(t_k) \leq r_i(t_{k-1}). \end{cases}$$

В качестве примера рассмотрим графическое представление показателя – приращение показателя организованности для случая четырех параметров ($q=4$).

Задана таблица (табл. 1) множества эталонных образцов и набор сочетаний признаков, $\{\Delta R_{\langle q \rangle}^*(t_k)\}$, которые проявляются при изменении состояний наблюдаемых трех ТИДТ в момент времени (t_k).

Таблица 1

Таблица обучения для ОК по четырем признакам

Объекты контроля	Индекс ИЦ	Значения признаков			
		x_1	x_2	x_3	x_4
ДС ¹	1	1	1	0	1
	2	0	1	0	0
	3	1	1	0	1
ДС ²	1	0	1	0	1
	2	1	1	1	1
	3	1	1	0	0
ДС ³	1	0	0	0	1
	2	1	1	1	1
	3	1	1	0	0
$\{\Delta R_{\langle q \rangle}^*(t_k)\}$		1	1	0	0

Тогда каждому подмножеству множества признаков можно сопоставить четырехэлементный бинарный вектор, или, что то же самое, вершину четырехмерного куба (рис. 5).

Соответственно, переход от одной вершины к другой будет свидетельствовать об изменении состояния СДС. В результате предложенных преобразований наблюдаемых параметров составных элементов исследуемой системы на заданном временном интервале получим траекторию эволюции ТИДТ, которая отображает траекторию эволюции состояний ТИДТ в

пространстве значений показателя организованности системы в плоскости рассматриваемых параметров.

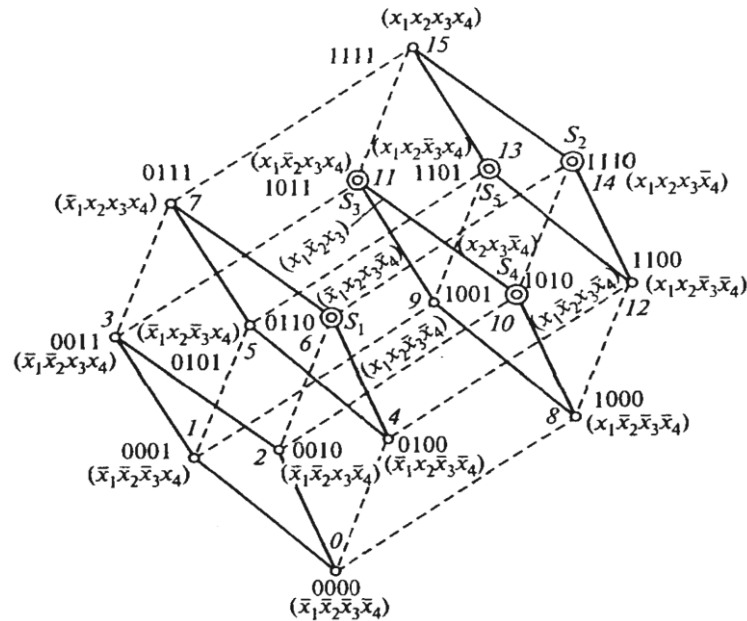


Рис. 5. Пример графического представления множества приращений показателя организованности в виде четырехмерного куба

Сущность метода идентификации состояния ДС состоит в выполнении индикаторных преобразований анализируемого состояния ДС с целью проверки степени проявления информативного признака – показателя организованности ДС.

Идентификация состояния ДС осуществляется в моменты времени t_k по каждому из Q регистрируемых в процессе наблюдения параметру путем отнесения значений характеристик $R_i(t_k)$ к одному из predetermined классов.

Главная идея, положенная в основу метода идентификации частично наблюдаемой телекоммуникационной инфраструктуры, заключается в переходе от пространства параметров элементов системы в пространство значений характеристик структурной организованности СДС в рассматриваемый момент времени с дальнейшей классификацией мгновенных состояний СДС с помощью предложенного комплексного параметра – показателя организованности.

Разработанный метод идентификации частично наблюдаемой ТИДС может быть взят за основу при формировании научно-методического аппарата распознавания изменений состояния системы (как последовательность смены класса состояния системы) в условиях априорной неопределенности относительно параметров ее функционирования для формирования эталонов последовательностей смены состояний.

Таким образом, разработанный метод идентификации частично наблюдаемой телекоммуникационной инфраструктуры с динамической топологией на основе энтропийного анализа ее наблюдаемых состояний в информационном поле представления дискретных систем позволяет получить эталонные динамические модели ТИДС.

Преимущество разработанного метода идентификации заключается в возможности построения обобщенных эталонных динамических моделей поведения частично наблюдаемых СДС в условиях ситуационной неопределенности относительно параметров их функционирования, так как он основывается на анализе изменений в наблюдаемой системе и не зависит от числа элементов системы.

ПРИМЕР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА ИДЕНТИФИКАЦИИ

Проиллюстрируем возможность построения эталонных динамических моделей ТИДТ для различных вариантов их развертывания (рис. 6).

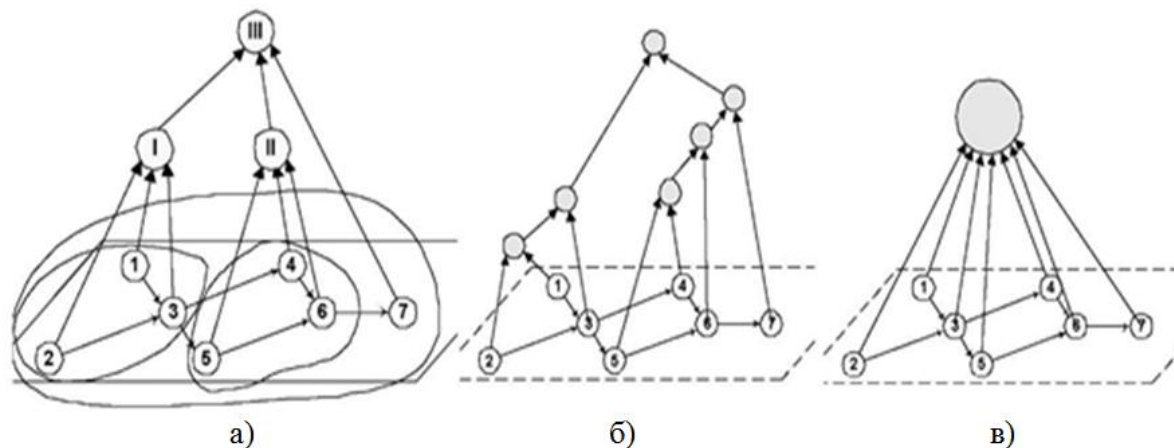


Рис. 6. Типовые варианты развертывания телекоммуникационной сети:
а – трехуровневая организация; б – двухуровневая организация;
в – веерная организация

В качестве наблюдаемых параметров взяты: число ТРД, повторяемость частот ТРД, дистанция между соседними ТРД, направление движения ТРД.

Тогда, в соответствии с предлагаемым методом, любому варианту построения (организации) ТИДТ можно поставить в соответствие матрицу, описывающую этапы изменения системы. При этом номер строки матрицы соответствует номеру этапа развития системы, номер столбца – номеру параметра, значение элемента матрицы определяется проявлением соответствующего параметра на определенном этапе.

На рис. 7 представлены примеры матриц, описывающих этапы эволюции системы для рассматриваемых вариантов организации.

$$\begin{array}{ccc}
 \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} &
 \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} &
 \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \\
 \text{а)} & \text{б)} & \text{в)}
 \end{array}$$

Рис. 7. Пример графического представления множества признаков приращения показателя организованности в виде четырехмерного куба для различных вариантов организации:
а – веерной; б – двухуровневой;
в – трехуровневой

На начальном этапе развертывания ТИДТ изменения наблюдаются по всем признакам. Поэтому первая строка заполнена «1». На завершающем этапе, т. е. когда ТИДТ развернута, изменения отсутствуют. Поэтому нижняя строка заполнена «0».

На рис. 7 показано графическое представление эталонной траектории ТИДТ в виде ломаной, соединяющей вершины четырехмерного куба.

В условиях воздействия стохастических факторов для оценивания близости получаемой траектории эволюции системы к одному из альтернативных эталонных вариантов может быть использовано расстояние между текущим и эталонным образом траектории эволюции системы.

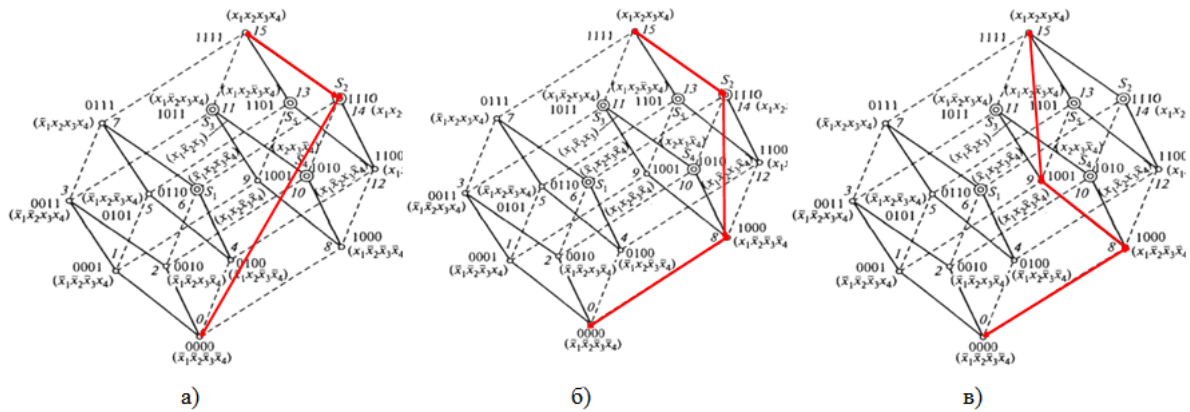


Рис. 8. Пример графического представления эталонных ЭТ ТИДТ для различных вариантов организации:

а – *верной*; *б* – *двухурвневой*; *в* – *трехурвневой*

В силу того что разработанный метод основывается на анализе изменений в наблюдаемой системе и не зависит от наличия априорных данных о ее функционировании, его несомненным достоинством является возможность построения обобщенных эталонных моделей поведения частично наблюдаемых ТИДТ.

Разработанный метод идентификации частично наблюдаемой телекоммуникационной инфраструктуры на основе энтропийного анализа динамической топологии может быть эффективно применен для решения задач оперативного вскрытия изменений ТИДТ в условиях априорной неопределенности относительно параметров их функционирования, что характерно для условий радиомониторинга сложных пространственно распределенных объектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный подход к построению обобщенных эталонных моделей частично наблюдаемых СДС основывается на анализе изменений в наблюдаемой системе и не зависит от числа элементов системы и от наличия априорных данных о функционировании системы, что обеспечивает универсальность его применения для решения широкого круга задач анализа сетевых структур различной природы.

Использование предложенной авторами в более ранних работах меры организованности сложных динамических систем для идентификации состояния телекоммуникационной инфраструктуры с динамической топологией оправдано в условиях отсутствия доступа к служебной командной информации, определяющей состав, структуру и характеристики информационного взаимодействия элементов.

Для решения задачи идентификации состояния наблюдаемой ТИДТ осуществляется преобразование результатов наблюдения параметров отдельных элементов системы в q -значные числовые комбинации, характеризующие динамику изменения показателя структурной организованности системы в плоскости наблюдаемых параметров.

Дальнейшие исследования планируется направить на анализ влияния случайных факторов на возможность оценивания состояния ТИДТ в информационном поле представления дискретных систем в пространстве наблюдаемых параметров.

Список используемых источников

1. *Golshid Sharifnia S., Saghaei A.* A statistical approach for social network change detection: an ERGM based framework // *Communications in Statistics. – Theory and Methods.* – 2020. – Doi: 10.1080/03610926.2020.1772981.
2. *Bonchi F., De Francisci G., Riondato M.* Centrality Measures on Big Graphs: Exact, Approximated, and Distributed Algorithms // *Proceedings of the 25th International Conference Companion on World Wide Web.* – 2016. – P. 1017–1020.
3. *Маковский В.Н., Данилюк А.С.* Теоретико-информационный подход при решении задач оценивания состояния систем связи с динамической топологией сети // *Естественные и технические науки: журн.* – 2018. – № 10. – С. 148–151.
4. *Маковский В.Н., Еремеев И.Ю., Свистунов Ф.Н.* Энтропийный метод распознавания состояния системы связи с динамической топологией сети // *Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского.* – 2016. – Вып. 650. – С. 41–47.
5. *Маковский В.Н., Еремеев И.Ю., Бережной И.В.* Метод оценивания организованности в задачах мониторинга военно-технических систем // *Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского.* – 2017. – Вып. 659. – С. 34–46.

В.А. Кузьмичев;
С.В. Пилькевич,
доктор технических наук

ПОДХОД К АГРЕГИРОВАНИЮ ОБЪЕКТОВ СЕТЕВОГО МОНИТОРИНГА НА ОСНОВЕ ГРАНУЛЯРНЫХ ОНТОЛОГИЙ

В статье рассматривается подход к организации хранения и обработки многомерных нечетких данных и знаний об объектах сетевого мониторинга. В качестве реализации механизма семантического масштабирования предложен метод гранулирования информации. Целью данной работы является демонстрация возможности применения теории гранулярных онтологий к информации, содержащейся в аккаунтах пользователей социальных сетей, что способствует снижению размерности исходных данных и формированию альтернативных наборов классов эквивалентностей. Проведенный вычислительный эксперимент показал высокую степень чувствительности исследуемого метода к параметрам исходных данных – сведениям о пользователях социальных сетей. Зафиксирована устойчивая взаимосвязь между количеством гранул и их размерностью, которая может быть выражена степенной функцией.

Ключевые слова: онтологии, гранулярные вычисления, агрегирование информации, социальные сети.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время многочисленные сервисы сети Интернет предоставляют практически неограниченные возможности сбора сведений об информационной обстановке с целью ее последующего анализа и построения прогнозных моделей. Благодаря своей доступности, динамичности и простоте использования, Интернет на сегодняшний день стал одним из самых популярных источников информации. Повышается его влияние на население по сравнению с традиционными средствами массовой коммуникации, он меняет модель информирования общественности о происходящих в мире событиях.

Люди не просто играют роль потребителей информации, циркулирующей в сети, но и сами являются ее источником. Технологической основой для этого являются различные онлайн-платформы, преимущественно социальные сети. На данных сервисах пользователи имеют возможность поддерживать неформальное общение, обмениваться друг с другом различным контентом, используя при этом форматы, такие как текст, изображения, аудио- и видеофрагменты и их комбинации.

Социальные сервисы содержат колоссальное количество информации, которая носит в основном неоднородный характер и может отражать различные аспекты информационного пространства, динамика изменения которого сильно зависит от разнообразных информационных воздействий (как имеющих реальную основу, так и вымышленных). Также интерес вызывает вопрос прогнозирования развития информационной обстановки в зависимости от различных возможных воздействий. В современных реалиях это является чрезвычайно важным элементом, учет которого существенно повышает результативность принятия управленческих решений.

Таким образом, понимание особенностей и исследование диапазонов характеристик распространения информационных сообщений в социальных сетях – это актуальные задачи как в научных кругах, так и в прикладной сфере. В результате возникает необходимость обработки больших объемов слабоструктурированной информации, к возникновению новых способов ее агрегирования, классификации и кластеризации.

ФОРМАЛИЗОВАННАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть имеется множество объектов $O = \{O_1, O_2, O_3, O_4 \dots O_n\}$ – анализируемых пользователей, каждый из которых характеризуется набором значений $S = \{S_{1,1}, S_{1,2} \dots S_{n,m}\}$ параметров $P = \{P_1, P_2 \dots P_m\}$. Например: год рождения, страна проживания, родной город, место работы и т.д. Исходные данные, соответствующие приведенной структуре, представлены в табл. 1.

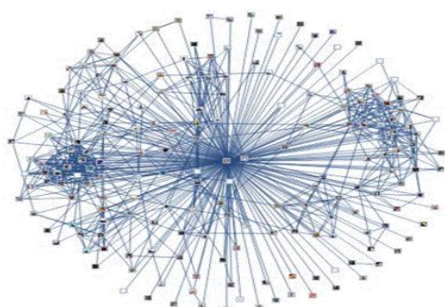
Таблица 1

Исходные данные для агрегирования информации

		Объекты					
		O_1	O_2	O_3	O_4	...	O_n
Параметры	P_1	$S_{1,1}$	$S_{2,1}$	$S_{3,1}$	$S_{4,1}$...	$S_{n,1}$
	P_2	$S_{1,2}$	$S_{2,2}$	$S_{3,2}$	$S_{4,2}$...	$S_{n,2}$

	P_m	$S_{1,m}$	$S_{2,m}$	$S_{3,m}$	$S_{4,m}$...	$S_{n,m}$

Требуется произвести агрегирование схожих анализируемых объектов в группы (кластеры) по заданным основаниям. В качестве основания агрегирования выбирается один или несколько параметров P , каждый из которых порождает соответствующие классы эквивалентностей объектов $[x]_P$. В таком случае необходимо найти совместное основание агрегирования P' , при котором порожденные классы эквивалентностей $[x]_{P'}$ образуют обобщенное множество объектов – идентифицированных пользователей социальных сетей. На рис. 1 представлен фрагмент исходных данных о пользователях социальных сетей, где узлы графа соответствуют аккаунтам пользователей, дуги – наличию дружественных связей, таблица – информации, содержащейся в аккаунтах пользователей.



Социальный граф пользователей социальной сети

Перечень значений параметров пользователей. Таблица с многоцветными колонками, содержащая различные атрибуты пользователей, такие как имя, фамилия, дата рождения, место рождения, образование, профессия, интересы и т.д. Каждая строка соответствует одному пользователю, а столбцы – различным параметрам.

Перечень значений параметров пользователей

Рис. 1. Графическое представление исходных данных

Перспективным направлением обработки большого объема разнородной информации является объединение информационных объектов в массивы, называемые гранулами. Таким образом, для решения поставленной задачи используются методы гранулярных вычислений.

ПОДХОД К АГРЕГИРОВАНИЮ ОБЪЕКТОВ СЕТЕВОГО МОНИТОРИНГА

Поскольку содержание сообщений (постов, комментариев и проч.), поступающих из социальных сетей не имеет четко организованной структуры, а оценочные суждения, представленные в них, как правило, являются нечеткими, то для организации хранения информации

представляется целесообразным использовать базы знаний (БЗ), построенные на основе онтологий.

Исходными данными для метода гранулирования является поисковый запрос пользователя к информационной системе, точнее к БЗ, входящей в ее состав. Запрос содержит перечень параметров P , являющихся элементами онтологии и характеризующихся некоторым набором свойств.

Процедура агрегирования (гранулирования) информации приводит к трансформации таблиц исходных данных в таблицы с различной семантикой строк и столбцов, в которых строки соответствуют группам (гранулам) первоначальных кортежей, а столбцы содержат агрегированную информацию об исходных значениях в каждой из групп. Результатом являются гранулы, которые соответствуют группам исходных кортежей с одинаковыми значениями, соответствующих нескольким заранее выбранным исходным столбцам [1]. На рис. 2 изображена обобщенная схема гранулирования данных, представленных в социальных сетях.

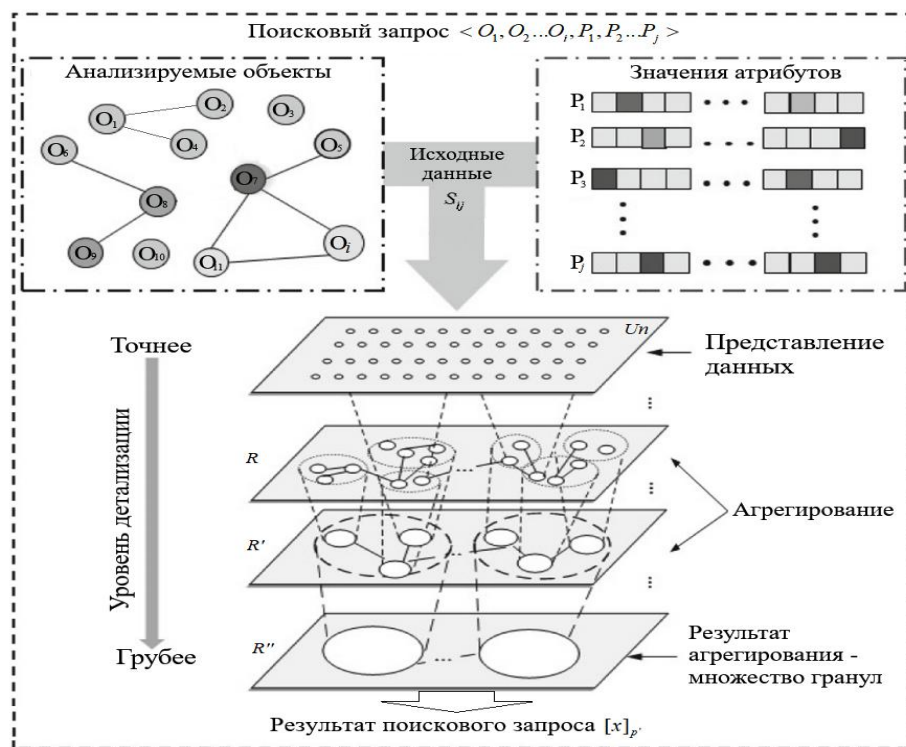


Рис. 2. Обобщенная схема гранулирования данных, полученных из социальных сетей

Для решения поставленной задачи примем в качестве аксиом следующие утверждения:

1. Информационные гранулы являются основными компонентами в представлении и обработке данных.

2. Степень детализации поискового запроса пользователя к системе (размер гранул) имеет ключевое значение для описания проблемной ситуации и зависит от специфики решаемых задач [2].

Формализованное описание процедуры грануляции сводится к следующему: пусть множество U_n — декартово произведение на плоскости, разбитое на множество непересекающихся ячеек сетки. В таком случае информация об этом множестве будет представлять собой границу ячеек сетки, принадлежащих исходному множеству. Отношение на $R \subseteq U_n \times U_n$ определим как $xRy \Leftrightarrow x \text{ and } y$. В таком виде R будет представлять собой отношение эквивалентности, соотносящее каждую ячейку сетки со строго определенным классом R . Допустим, что X — некоторая область в U_n , тогда верхнюю аппроксимацию X для X обозначим как объ-

единение всех классов R , пересекающихся с областью X , а нижнюю аппроксимацию – как объединение всех классов R , целиком содержащихся в X :

$$\bar{X} = \{x: R(x) \cap X \neq \emptyset\} = \bigcup \{R(x): x \in X\}, \quad (1)$$

$$\underline{X} = \{x: R(x) \subseteq X \neq \emptyset\} = \{x: R(x) \subseteq X\}. \quad (2)$$

Пространство аппроксимации обозначим как пару Un, R , где R – отношение эквивалентности на множестве Un . [3]. Задание пространства аппроксимации позволяет отличать объекты, которые принадлежат различным классам эквивалентности R , но не внутри одного класса.

Развитием изложенных идей является понятие неточного множества, представляющего собой пару A_{RS}, B_{RS} , для которой выполняются следующие аксиомы [4]:

1. A_{RS} и B_{RS} – пустые множества либо объединения классов эквивалентности из R .
2. $A_{RS} \subseteq B_{RS}$.
3. Если C_{RS} – отдельный подкласс из B_{RS} , то $C_{RS} \subseteq A_{RS}$.

Неточные множества являются аппроксимациями подмножеств Un , т. е. для $\forall X \subseteq Un$ не представляется возможным различить элементы внутри классов эквивалентности R и можно утверждать, что $\forall x \in Un$ является элементом X только для целых классов $R(x)$.

Аналогично можно быть уверенным, что $\forall x \notin X$, только если класс $R(x)$ не имеет общих элементов с X , тогда формулы (1) и (2) определяют неточную аппроксимацию. Данные понятия в целом соотносятся с интерпретациями, принятыми в модальной логике: $x \in X$, если x точно является элементом X , и $x \in X$, если x возможно является элементом X в соответствии со знаниями, использованными при гранулировании для R . Это разбиение обозначается Un/R .

Классы эквивалентности разбиения представляют собой элементарные гранулы. Все знания об исходном множестве ограничиваются информацией об отдельных гранулах, тогда как внутренние элементы гранул неразличимы [5].

Проиллюстрируем вышеизложенное примером. Рассмотрим множество объектов $O = \{O_1, O_2, O_3, O_4, O_5, O_6, O_7, O_8, O_9\}$ – пользователей социальной сети, характеризующихся набором значений параметров $P = \{P_1, P_2, P_3, P_4, P_5\}$, где $P_i \in \{0, 1, 2\}$. Исходные данные, соответствующие приведенной структуре, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Исходные данные для гранулирования

		Объекты									
		O_1	O_2	O_3	O_4	O_5	O_6	O_7	O_8	O_9	O_{10}
Параметры	P_1	1	1	2	0	2	0	2	0	2	2
	P_2	2	2	0	0	1	0	0	1	1	0
	P_3	0	0	0	1	0	1	0	2	0	0
	P_4	1	1	1	2	2	2	1	2	2	1
	P_5	1	1	0	1	1	2	0	1	2	0

В случае рассмотрения полного набора параметров $P = \{P_1, P_2, P_3, P_4, P_5\}$ (основания гранулирования) получаем семь классов эквивалентностей объектов $[x]_P$, образованных информационными гранулами $[x]_P = \{\{O_1, O_2\}, \{O_3, O_7, O_{10}\}, \{O_4\}, \{O_5\}, \{O_6\}, \{O_8\}, \{O_9\}\}$.

В результате пару объектов $\{O_1, O_2\}$ нельзя отличить друг от друга на основе доступных параметров, аналогично трем объектам в пределах второго класса эквивалентности $\{O_3, O_7, O_{10}\}$. Оставшиеся пять объектов различимы в рассматриваемом основании гранулирования.

Пусть в качестве основания гранулирования выбран параметр $P = \{P_1\}$, что может соответствовать, например, ситуации, когда в аккаунтах пользователей социальной сети видимым является только один этот параметр. Тогда получим следующую структуру гораздо более грубых классов эквивалентности: $[x]_P = \{\{O_1, O_2\}, \{O_3, O_5, O_7, O_9, O_{10}\}, \{O_4, O_6, O_8\}\}$. Уровень детализации в сравнении с предыдущим примером существенно снизился – размеры гранул увеличились.

Представляет интерес выявление зависимостей, которые могут возникнуть на одном уровне детализации, но отсутствуют на другом, т. е. выбор атрибутов будет влиять на обнаруженные зависимости между объектами [6]. Пусть выбраны два различных основания гранулирования $P = \{P_2, P_3\}$ и $Q = \{P_4, P_5\}$, каждый из которых порождает соответствующие классы эквивалентностей объектов $[x]_P = \{\{O_1, O_2\}, \{O_3, O_7, O_{10}\}, \{O_4, O_6\}, \{O_5, O_9\}, \{O_8\}\}$ и $[x]_Q = \{\{O_1, O_2\}, \{O_3, O_7, O_{10}\}, \{O_4, O_5, O_8\}, \{O_6, O_9\}\}$. Тогда совместное основание гранулирования $P' = \{P_2, P_3\} \& \{P_4, P_5\}$ порождает классы эквивалентностей $[x]_{PQ} = \{\{O_1, O_2\}, \{O_3, O_7, O_{10}\}\}$, образованных парой информационных гранул. Множество $[x]_{PQ}$ интерпретируется как множество объектов, которые могут быть классифицированы при рассмотрении классов эквивалентности $[x]_Q$ на основании знаний $[x]_P$. Графическое представление объединения пользователей в информационные гранулы по таким основаниям, как активность, наличие аудио-, видеоконтента, местоположения, изображено на рис. 3.

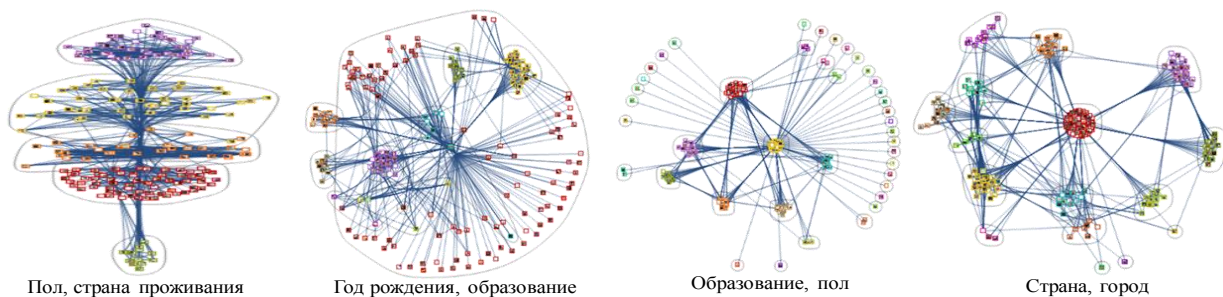


Рис. 3. Пример гранулирования информации об объектах социальных сетей по различным основаниям

В конечном итоге могут возникать ситуации, когда результатом гранулирования является пустое множество. Вербально речь идет о том, что в БЗ может отсутствовать информация, инициированная запросом, например «найти всех лиц женского пола, глав государств ОДКБ, не старше 40 лет, обладающих европейской внешностью».

Формально требования, предъявляемые к искомому объекту, задаются через наличие/отсутствие, а также выраженность различных параметров. Пусть $P = \{P_2, P_3\}$ порождает класс эквивалентностей объектов $[x]_P = \{\{O_1, O_2\}, \{O_3, O_7, O_{10}\}, \{O_4, O_6\}, \{O_5, O_9\}, \{O_8\}\}$, далее $Q = \{P_4\}$ «разбивает» множество объектов следующим образом: $[x]_Q = \{\{O_1, O_2, O_3, O_7, O_{10}\},$

$\{O_4, O_5, O_6, O_8, O_9\}$. В результате совместное основание гранулирования $PQ = \{P_4\} \& \{P_2, P_3\}$ порождает классы эквивалентностей $[x]_{PQ} = \emptyset$.

ПРОВЕДЕНИЕ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве исходных данных для проверки работоспособности метода, был сформирован массив, содержащий информацию о 2200 случайных пользователях социальной сети ВКонтакте (рис. 4).

ССЫЛКА НА ПРОФИЛЬ	ИМЯ	ФАМИЛИЯ	ПОЛ(3)	СТРАНА(4)	ГОРОД(5)	ЛЕТ(6)	ДАТА РОЖДЕНИЯ (7)	УСТРОЙСТВО	РОДНОЙ ГОРОД(9)	ТЕКУЩАЯ ЗАНЯТОСТЬ(10) ...
https://vk.com/id7835781	Евгений	Михайлов	М	Россия	Нижний Новгород	25	04.02.1995	iPhone app	Нижний Новгород	
https://vk.com/id2960294	Анастас	Халилов	Ж	Россия	Москва	20	30.08.2000	Android app	Санкт-Петербург	Per Aspera предметная фото
https://vk.com/id2944884	Наталья	Фролова	Ж	Россия	Лесной	48	14.04.1972	vk.com	Санкт-Петербург	Газета Время, город Нижняя Т
https://vk.com/id7635957	Екатерина	Васильева	Ж	Россия	Москва	19	29.06.2001	iPhone app	Санкт-Петербург	ВГИК
https://vk.com/id1188471	Оля	Рябенко	Ж	Россия	Рыбинск	36	09.06.1984	Android app	Йошкар-Ола	ОАО НПО "Сатурн"
https://vk.com/id5715781	Инна	Кравчук	Ж	Россия	Москва	19	11.05.2001	Android app	Краснодар	НТИ (филиал) РГУ им. А. Н. Кс
https://vk.com/id601794	Елена	Пальцева	Ж	Россия	Симферополь	25	26.08.1995	vk.com	Екатеринбург	КГУ им. Н. А. Некрасова (КФ)
https://vk.com/id6337113	Денис	Носов	М	США	New York	23	29.01.1997	iPhone app	Вологда	marisandu
https://vk.com/id7201672	Надя	Иванченко	Ж	Россия	Москва	27	21.01.1993	Android app	Ижевск	Фотограф Раиса Шишкина
https://vk.com/id7616523	Витёк	Туркин	М	Россия	Нахабино	23	24.12.1996	Android app	Дзержинск	РУТ (МИИТ) (бывш. МГУПС ИИ

Рис. 4. Фрагмент данных пользователей социальной сети ВКонтакте

Результаты гранулирования исходных данных показаны на графиках (рис. 5 и 6). При гранулировании объектов по трем основаниям наибольшее число пользователей объединилось во множество, состоящее из 238 объектов, по четырем основаниям – из 15 объектов.

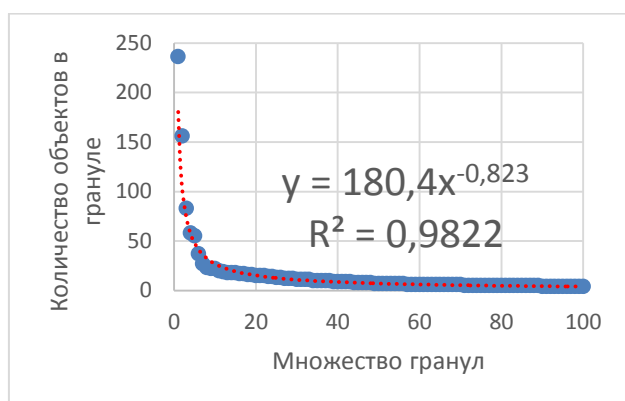


Рис. 5. Гранулирование по трем основаниям (пол, страна, город)

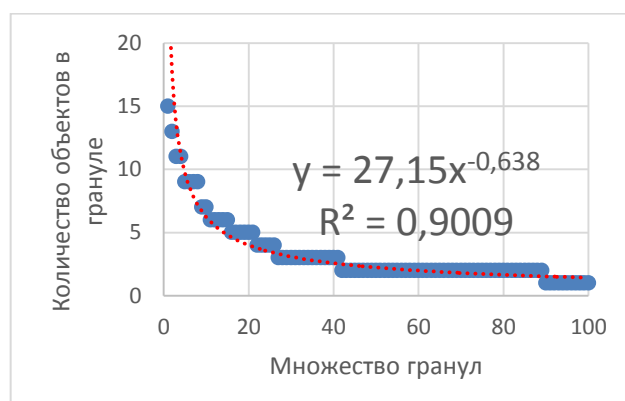


Рис. 6. Гранулирование по четырем основаниям (пол, страна, город, возраст)

Исходя из вышеизложенного можно сделать вывод о том, что при увеличении количества оснований классификации размер гранул уменьшается, тем самым увеличивая детализацию ответа информационной системы. При дальнейшем увеличении числа оснований количество пользователей в одном кластере сокращается до одного или вовсе представляет собой пустое множество. Данная устойчивая взаимосвязь описывается степенной функцией вида $y = ax^{-b}$. Значения коэффициентов a и b зависят от характера и объема исходных данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Агрегирование данных на основе гранулярных вычислений является одним из современных инструментов обработки больших объемов разнородной информации.

Проведенный вычислительный эксперимент показал высокую степень чувствительности исследуемого метода гранулирования к параметрам исходных данных: в качестве объектов сетевого мониторинга рассматривались пользователи социальной сети, выбранные случайным образом и в большинстве своем не связанные друг с другом (относящиеся к разным сетевым сообществам, не являющиеся подписчиками друг друга или участниками какого-либо форума). В результате большинство сформированных гранул содержат по одному объекту. В качестве перспективного направления для дальнейших исследований представляется целесообразным:

- 1) предъявление требования к исходным данным по наличию связей между анализируемыми объектами;
- 2) применение процедуры гранулирования к отдельным параметрам объектов, таким как возраст, страна, родной город и т. д.;
- 3) переход от точечных оценок к интервальным, что увеличит степень связности графа исходных данных.

Список используемых источников

1. *Lin T.Y.* Granular computing: examples, intuitions and modeling // Proc. of IEEE Int'l Conf. on «Granular Computing». – 2005, Beijing, China (GrC'05). – P. 40–44.
2. *Zadeh L.A.* Fuzzy Sets and Information Granularity // Advances in Fuzzy Sets Theory and Applications / Ed. by M.M. Gupta, R.K. Ragade, R.R. Yager. – Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1979. – P. 3–20.
3. *Pawlak Z.* Granularity of knowledge, indiscernibility and rough sets. – Amsterdam, 1998. – P.106–110
4. *Тарасов В.Б.* Грануляция информации, нестандартные и гибридные нечеткие множества // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте: сб. тр. VI Междунар. науч.-практ. конф. Коломна, 16–19 мая 2011 года. – М.: Физматлит, 2011. – Т. 1. – С. 35–49.
5. *Бутенков С.А., Кривша В.В., Аль-Доуяни С.Х.* Оптимальное гранулирование многомерной информации // Известия ТРТУ. Тематический выпуск. – С. 37–45.
6. Многоуровневое представление разнородных нечетких параметров для идентификации состояний объекта контроля / П.А. Глыбовский [и др.] // Труды СПИИРАН. – 2015. – Вып. 1(38). – С. 204–217.

Д.Н. Бирюков,
доктор технических наук, доцент;
А.М. Воробьёв;
А.В. Ястребов

ОПЫТ ПОДГОТОВКИ И ПРОВЕДЕНИЯ СОРЕВНОВАНИЙ ПО КОМПЬЮТЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Представлено описание апробированного подхода к подготовке и применению комплекса программных и технических средств для проведения соревнований в области компьютерной безопасности в формате *Capture the Flag*. Предлагается способ оперативного выявления атак на платформу проведения соревнований.

Ключевые слова: *Capture the Flag*, CTFd, компьютерная безопасность, соревнования, мониторинг ресурсов информационных систем.

ВВЕДЕНИЕ

CTF (англ. *Capture the Flag*) – это соревнования по компьютерной безопасности, целью которых является решение заданий различных категорий, связанных с безопасностью информации (веб-технологии, реверс-инжиниринг, криптография, форенсика и т. д.), а ответом к заданию является флаг – строка определенного формата. Указанный формат проведения соревнований показал свою гибкость и востребованность в сфере информационных технологий. CTF проводится не только для студентов вузов с целью повышения их заинтересованности в выбранной профессии и улучшения приобретенных навыков на практике, а также для набора новых сотрудников ИТ-(англ. *Information technology*)организаций, аттестации существующего штата и обучения их новым технологиям и стандартам в ходе состязания.

Что касается гибкости, то данные соревнования могут проводиться в различных форматах: CTF может быть командным или индивидуальным, онлайн или офлайн, классическим или «*jeopardy*». Но сложность заключается в том, что, в отличие от большинства олимпиад по дисциплинам, где от организаторов в основном требуется предоставить задания и проверяющую комиссию, CTF требует подготовить проверяющую платформу и правильно настроенные сервисы с заданиями.

Следует отметить, что участниками соревнований являются специалисты по компьютерной безопасности, которые могут производить деструктивные воздействия как на саму платформу, так и на предложенные для решения задания. В этом случае неправильная конфигурация сервера, ошибки в реализации программ и правах доступа могут привести к нарушению стабильности различных компонентов соревнований и созданию условий для нечестной игры. Кроме того, довольно часто организаторы подобных мероприятий не рассчитывают долю потребления ресурсов различными сервисами, не уделяют время вопросам их правильной настройки и не выделяют требуемое количество ресурсов, что приводит к снижению качества всего соревнования в целом.

Организаторами CTF-соревнования часто становятся учебное заведение, ИТ-организация или CTF-команда, вследствие этого все недочеты в работе платформы, доступности сервисов, качестве проработки и реализации заданий сказываются на их репутации. Именно поэтому необходимо уделить особое внимание всем вышеперечисленным проблемам, а также организовать систему мониторинга для отслеживания происходящих инцидентов с целью оперативного принятия решений по их устранению.

Данная статья отражает трехлетний опыт проведения соревнований в формате СТФ и может быть полезна для тех, кто собирается организовать соревнования подобного типа, и может помочь организаторам в будущем избежать возможных недочетов.

ПОДХОД К ОРГАНИЗАЦИИ РАБОТЫ НАД ПРОЕКТОМ

Как и любой крупный проект, разработка СТФ-соревнований требует грамотного распределения сил, времени и ресурсов, а также согласованной работы разработчиков.

Для начала необходимо определиться с форматом олимпиады, количеством и уровнем сложности задач, назначить наиболее подходящих для соответствующих целей людей и далее переходить непосредственно к разработке.

Форматом СТФ рекомендуется выбрать *Jeopardy* – формат, при котором участнику предлагается решить определенное количество заданий различных категорий за отведенное время. При выборе количества задач и уровня их сложности следует отталкиваться от имеющегося в наличии времени для разработки и накопленного опыта.

Как было отмечено выше, целесообразно уделить большое внимание обсуждению идей и задач. Замысел хорошей задачи, а тем более 30 хороших задач, не может появиться в один день, поэтому рекомендуется заранее записывать возникающие идеи и в момент начала обсуждения предложить их для рассмотрения.

В первую очередь выбираются категории. Они, как правило, выбираются исходя из наличия соответствующих навыков у команды разработчиков. Далее определяются целевая аудитория и уровень сложности. Например, для сотрудников ИТ-компании целесообразно добавить реальные задачи, которые могут встретиться в ходе работы. В качестве задания им можно предложить для решения неправильно сконфигурированное программное обеспечение, которым активно пользуется вся компания.

Для записи и обсуждения идей хорошо подойдет менеджмент-платформа *Trello* [1], которая представляет собой виртуальную доску задач с карточками и метками, возможностью установления сроков и комментирования действий других пользователей. Но в связи с тем, что следующим этапом является непосредственно разработка задач, целесообразно использовать GIT-систему контроля версий, можно использовать функционал таких ресурсов, как *Gitlab* и *Github*. Обе данные платформы для совместной разработки имеют модуль *Boards* (на русском – доски).

Для совместной разработки заданий, отслеживания их состояния и обсуждения вопросов была выбрана платформа *Gitlab*. Обсуждение заданий велось с помощью *issues* (обсуждения) платформы *Gitlab*, отсортированных с помощью меток в разделе «Доски обсуждений».

В проекте использовались следующие метки:

«*Реализовано*» – разработчик создал задание по всем требованиям и предоставляет его для проверки;

«*Есть вопросы*» – задание было частично проверено ответственным за подготовку заданий (ответственным) и требует доработки;

«*Проверено*» – задание проверено ответственным и готово к размещению;

«*Финальное*» – задание на 100% готово к размещению на платформу, проверено и протестировано, все данные соответствуют реальным (ссылки на сайты, названия файлов и т. д.);

«*На платформе*» – задание размещено на используемой платформе и готово к выдаче игрокам;

«*Нужно исправление*» – задание требует быстрой и срочной доработки, введено в режим технических работ.

Рекомендуется для каждого задания задать шифр, по которому разработчики смогут легко ориентироваться в спроектированных программах и вносить исправления как можно быстрее. Например, задание из категории ВЕБ среднего уровня сложности, представляющего со-

бой блог с заранее внесенной XSS-уязвимостью, следует назвать как *Web-m3-blog-xss*. Это название должно стать заголовком для карточки из доски обсуждения, а также названием docker-контейнера сервиса при его наличии.

Сама карточка с доски представляет собой заголовок, шифр которого был предложен выше. На карточку легко добавляются метки проекта, для которых возможно задать оповещения для назначенного на ее реализацию разработчика (на электронную почту). Пример карточки изображен на рис. 1.

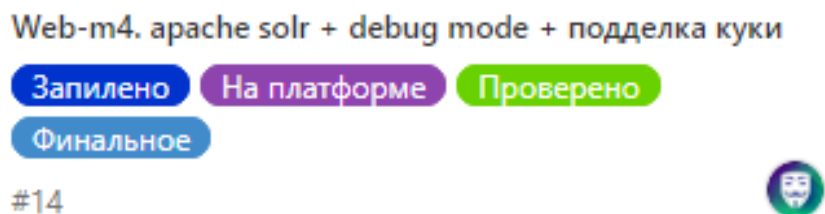


Рис. 1. Пример карточки обсуждения задания

Внутри самой карточки возможно добавлять поясняющие комментарии, загружать файлы и картинки, отслеживать историю меток (рис. 2).

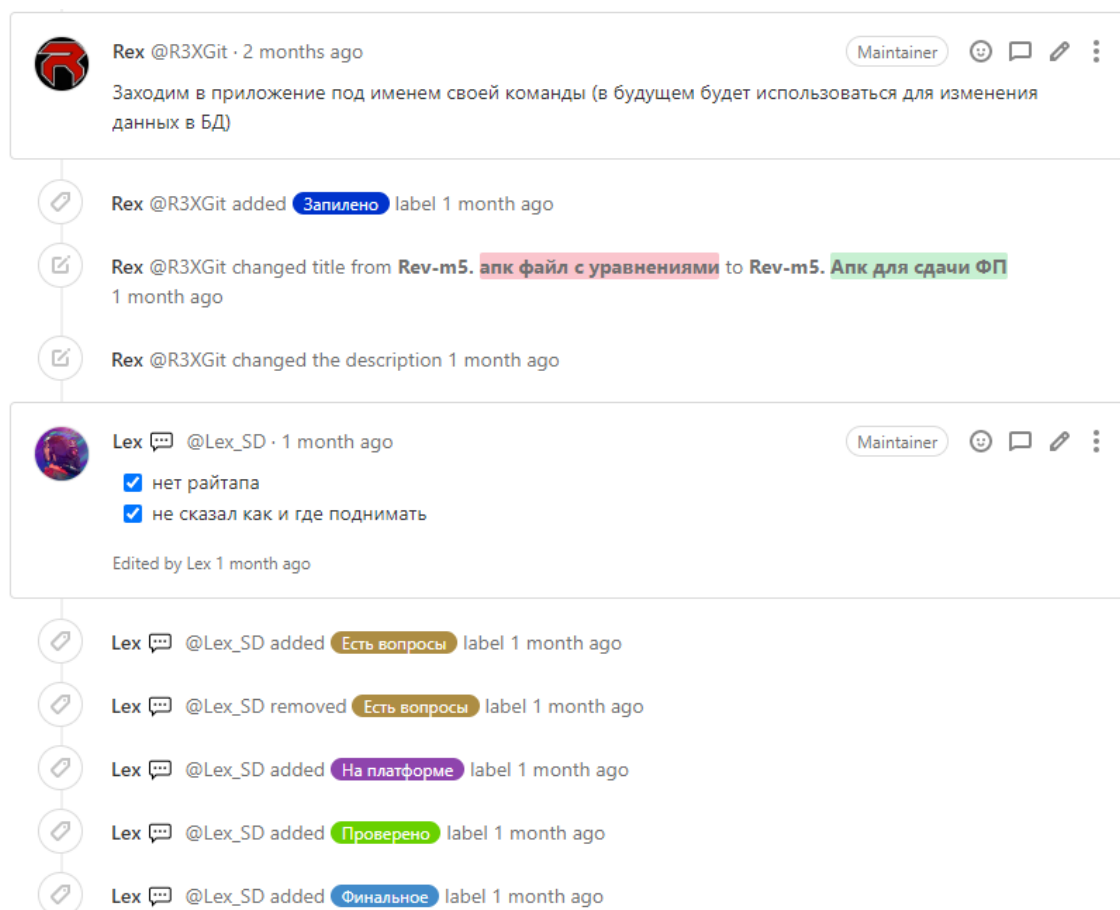


Рис. 2. Пример обсуждения задания

Как уже было сказано ранее, разработку рекомендуется вести в системе контроля версий. Но для простой ориентации в файлах разработчиков и каталогах можно задать структуру, показанную на рис. 3.



Рис. 3. Структура проекта

Если соответствовать данным требованиям, то разработчики смогут сэкономить много времени как во время самой разработки, так и во время разворачивания готовых задач на платформу и сервер.

ВЫБОР ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ СОРЕВНОВАНИЙ

Для размещения платформы (проверяющей системы) и системы логирования необходимо определиться с количеством выделяемых ресурсов. Количество ресурсов зависит от разработанных задач, которые требуют размещения на сервере, от выбранной или спроектированной платформы, а также предполагаемого количества участников.

Платформа, системы логирования, требующие серверной составляющей задания, были размещены на виртуальных серверах ubuntu 16 TLS. Всего было использовано 4 VPS, три с характеристиками 4 ядер, 15 ГБ ОЗУ, SSD-диск, а один – 8 ядер и 32 ГБ ОЗУ. Для работы с серверами использовалось разграничение доступа, доступ по ssh-ключам. Для быстрого доступа и удобного редактирования файлов, выполнения команд и отслеживания docker-контейнеров использовался редактор *Visual Studio Code*.

Все сервисы были запущены как docker-контейнеры с помощью утилиты *docker-compose*. Технология контейнеризации позволяет создать изолированное окружение для различных сервисов в пределах одного хоста и быстро развернуть их на любом сервере без дополнительных настроек. Каждый сервис имел файл настроек *docker-compose.yml*, а для создания образа – *Dockerfile*.

Исходя из опыта организации соревнований, а также участия в других CTF-соревнованиях рекомендуется использовать открытую платформу CTFd [2]. Данная платформа активно поддерживается разработчиками, периодически выходят ее новые версии с многочисленными исправлениями.

Платформа имеет весь необходимый для CTF функционал – регистрация команд/пользователей, предоставление описаний заданий с приложенными файлами, сдача флагов и получение очков, турнирная таблица.

Язык платформы – английский, поэтому для комфортного использования русскоязычными пользователями необходимо будет самостоятельно произвести перевод.

CTFd базируется на *Python* фреймворке *Flask* с использованием модуля *Blueprint*. В качестве базы данных программа использует *MariaDB*, но обращения к ней идут через ORM *sqlalchemy*. Так как веб-сервер *Python*'а не выдерживает большой нагрузки, в платформе предусмотрено использование автономного веб-сервера *Gunicorn* [3].

Вся платформа может быть развернута в виде docker-контейнера. Технология контейнеризации *Docker* [4] рекомендуется к использованию не только для платформы, но и для всего стека мониторинга, а также разрабатываемых задач.

Для ее настройки следует изменить следующие параметры в файле *docker-compose.yml*:

Ctfд: ports. Здесь необходимо указать внешний порт, на котором предполагается разместить платформу;

db: ports. База данных (БД) по стандарту доступна только контейнерам той же сети. При необходимости можно самостоятельно указать внешний порт и сделать БД доступной извне. Но тогда необходимо позаботиться о надежной защите, установить сложный пароль, ограничить права пользователей;

DATABASE_URL, MYSQL_ROOT_PASSWORD, MYSQL_USER, MYSQL_PASSWORD. Данные параметры позволяют изменить имя пользователя и пароль к БД;

WORKERS. Важный параметр, который позволяет работать веб-серверу *gunicorn* в многопоточном режиме (из формулы количество ядер * 2 + 1).

Также рекомендуется улучшить внешний вид платформы. На рис. 4–6 приведен пример модифицированной платформы, разработанной для соревнований «VKA-CTF`2020». Ее разработчиками был изменен интерфейс, добавлен личный зачет, а также античит-система, позволяющая определить игроков, нарушающих правила. Особенности данной системы будут описаны ниже.

Приветствуем Вас на VKA-CTF`2020!

С головой окунитесь в военную атмосферу, духом которой пропитано все наше соревнование, а также пройдите через все "тяготы и лишения" жизни ЦТФ-бойца.



Основная информация

Соревнования начинаются 4 июля 2020 года в 18:00 (Мск) и длятся 24 часа.

Ответом к заданию является флаг - строка определенного формата (`vka{[A-Za-z0-9_!\?]+}`), которую необходимо найти в ходе его решения.

Задания распределены по уровням сложности в порядке возрастания - **Абитура** (поступление в академию), **КМБ** (Курс молодого бойца), **1-3 курс**, **4-5 курс** и, наконец-таки, **ВЫПУСК**. У каждого задания есть отметка о его принадлежности к соответствующему CTF жанру.

ОБЯЗАТЕЛЬНО подпишитесь на телеграм-канал соревнования. Там вы найдете самую оперативную информации о заданиях и каких-либо изменениях, а также сообщения о "ферстбладах" и "ферстранках", сделанных пользователями.



Регистрация

- Для участия в олимпиаде необходимо пройти **регистрацию** каждому участнику команды, а капитану создать команду и добавить в нее всех участников.
- Если команда представляет военный ВУЗ, то при ее регистрации необходимо поставить соответствующую отметку.
- Если команда участвует вне конкурса (не является студенческой), то при ее регистрации необходимо поставить соответствующую отметку.

Обязательно ознакомьтесь с **правилами** состязания

Желаем Вам удачи!



Сделано с душой

Рис. 4. Главная страница платформы CTFd после модификации интерфейса

Правила соревнований являются обязательными. Они не только определяют порядок участия, но и помогут избежать спорных ситуаций. Однако так как соревнования проводятся в онлайн-формате, то контроль за соблюдением правил участниками становится нетривиальной задачей.

Важно отметить в правилах соревнований запрет на создание виртуальных команд и обмен флагами с другими участниками. Для контроля честной игры всеми участниками используется система, которая была успешно протестирована на «VKA-CTF`2020».

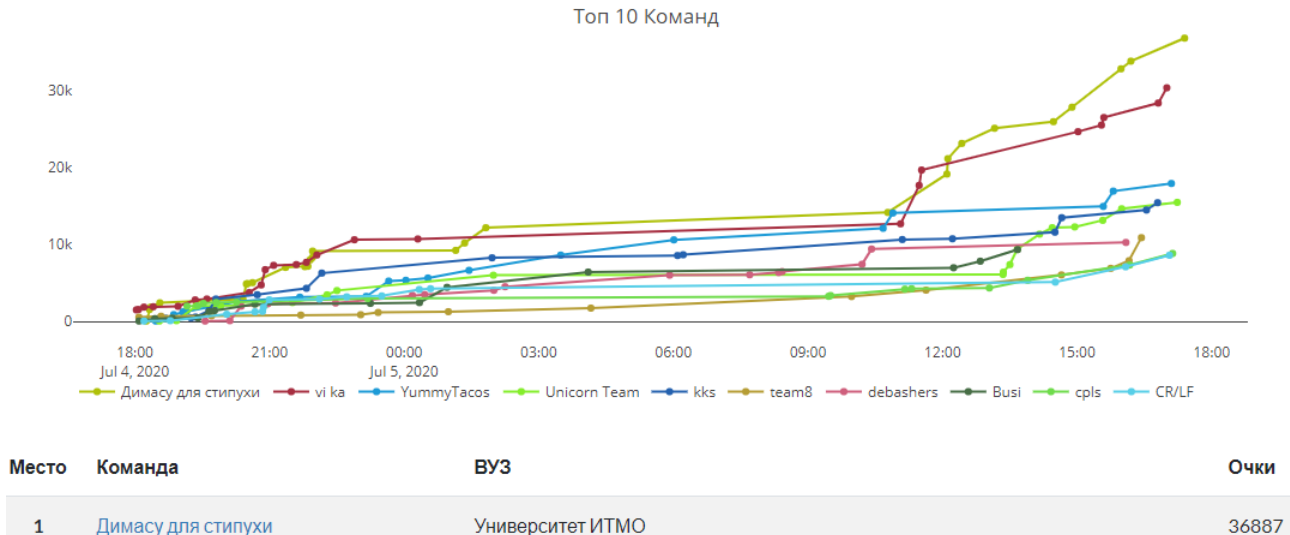


Рис. 5. Турнирная таблица командного зачета

VKA-CTF 2020 Правила Личный зачёт Команды Результаты Задачи Канцелярия Команда Профиль Настройки

Личный зачёт

Место	Товарищ	Команда	ВУЗ	Очки
1	майор-взлом DOOMovenok	vi ka	ИТМО	17741
2	старший хакер Rubikoid	kks	РТУ Мирэа	14622
3	старший хакер Крейсер	Димасу для стипухи	Университет ИТМО	14001
4	реверс-лейтенант 4e60KcaPcKuи`	Димасу для стипухи	Университет ИТМО	10673

Рис. 6. Турнирная таблица личного зачета

Платформа CTFd позволяет отслеживать IP-адреса всех зарегистрировавшихся пользователей, а также периодически обновляет эту информацию, добавляя новый адрес, если пользователь изменил его. Таким образом, используя данную функциональность, организаторы могут отслеживать одинаковые IP-адреса, которые встречаются у нескольких пользователей.

При создании новой команды, а также при аутентификации участников на платформе система выполняет поиск по БД всех пользователей, чей IP-адрес совпадает со вновь вошедшим участником. Если результат поиска успешен, система проверяет названия команд, в которых состоят найденные игроки. Различие в названиях говорит об использовании участниками нескольких виртуальных команд, что запрещено правилами соревнований. На рис. 7 представлен пример уведомления в telegram о соответствующем инциденте.

Одним из основных способов контроля за честным решением заданий является анализ скорости решения определенного задания. Ни одно задание не может быть решено менее чем за минуту с учетом того, что игрокам необходимо потратить это время на чтение описания и открытие самого задания. Платформа CTFd не имеет встроенной функциональности отслеживания скорости решения задания. Для хранения информации о решениях требуется создать дополнительную таблицу. При открытии описания к заданию необходимо в данной таблице добавить запись о времени открытия задания, названии задачи, участнике, а также о команде, в которой он состоит. Также необходимо добавить аналогичную запись после ре-

шения задачи. Система в этот момент вычисляет скорость решения задания и, если оно менее чем 60 сек. (время можно изменить), то выполняет оповещение организаторов с использованием мессенджера telegram.

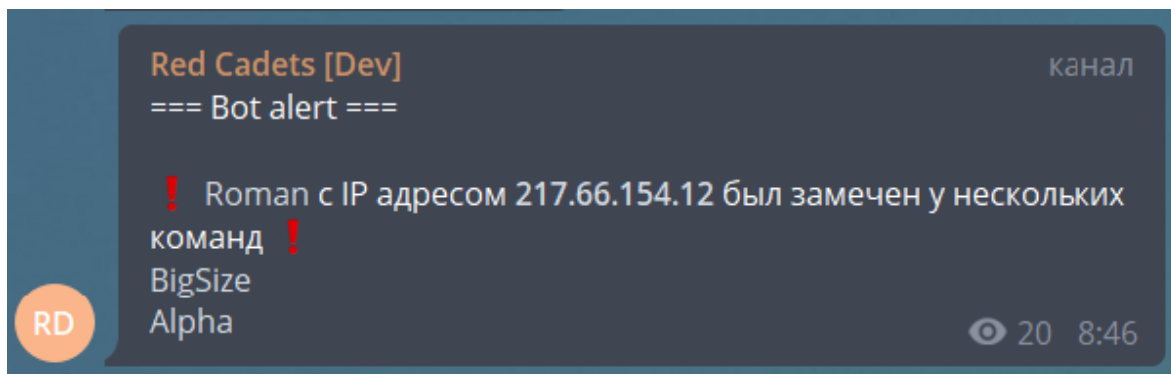


Рис. 7. Оповещение об использовании пользователем нескольких команд

Кроме того, рекомендуется самостоятельно реализовать систему персональной выдачи флагов каждой команде отдельно, для того чтобы уменьшить количество случаев их обмена между участниками и выявить нарушителей правил. С этой целью можно на базе платформы STFd создать специальное API, которое будет выдавать сервисам с заданиями уникальные флаги, генерируемые от ID команды в базе данных.

Вместе с тем предлагается создать систему, которая будет видоизменять созданный организаторами флаг с помощью кодировки leet (переводящей некоторые буквы алфавита в цифры). Так, из флага «vka{so_hard_xss_for_you}» можно сформировать множество вариаций: «vka{5o_h4rd_x55_f0r_you}», «vka{s0_h4rd_x5s_for_y0u}», «vka{50_hard_xs5_f0r_y0u}». Благодаря этому участники могут не заметить присутствие системы индивидуальной выдачи флагов и опрометчиво поделиться ими с другими командами. Тогда система приема флагов определяет нечестных игроков и сообщает об этом организаторам.

ПОДХОД К РЕАЛИЗАЦИИ МОНИТОРИНГА РЕСУРСОВ ПЛАТФОРМЫ: МОНИТОРИНГ DOCKER-ХОСТОВ И DOCKER-КОНТЕЙНЕРОВ

Для мониторинга состояния системы, нагрузки, количества исходящего/входящего трафика, использования CPU, виртуальной и физической памяти, а также визуализации этих метрик с уведомлением в Telegram-bot предлагается использовать мониторинг-стек, который содержит в себе следующие компоненты, изображенные на рис. 8:

Prometheus [5] – сбор и хранение метрик с Node Exporter и cAdvisor;

Grafana [6] – визуализация метрик в виде графиков/панелей на dashboard-ax;

CAAdvisor [7] – сбор и хранение метрик с Docker-контейнеров;

Node Exporter [8] – сбор и хранение метрик с Docker-хостов;

Alert Manager [9] – работа с оповещениями и отправка их в назначенный телеграм-канал (Telegram-bot).

Рассматриваемый стек имеет несколько альтернатив, выбор которых зависит от предпочтений администратора, так как все они выполняют требуемую задачу достаточно хорошо. Приведем примеры реализаций наиболее популярных из них:

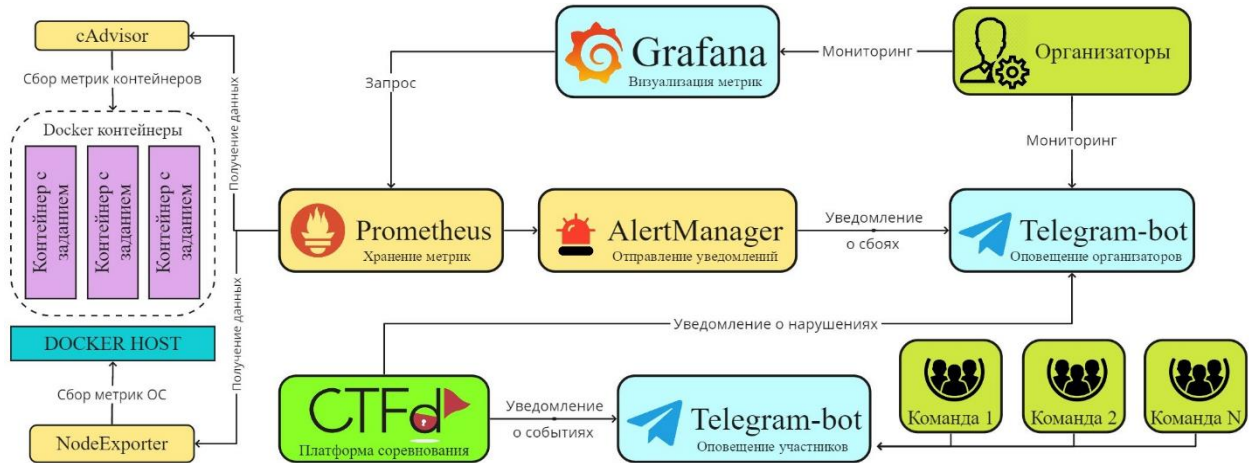


Рис. 8. Схема системы мониторинга

1) Prometheus + InfluxDB + Grafana.

В указанном стеке InfluxDB [10] используется для обработки данных, все компоненты распространяются по свободной лицензии. Grafana содержит ряд досок (англ. – *dashboard*) под этот стек. К сожалению, у рассматриваемого стека есть большой минус – отсутствие возможности работы с логами. Работа с оповещениями производится средствами Prometheus.

2) Prometheus + ELK stack (ElasticSearch + Logstash + Kibana).

В таком стеке для индексации данных применяется ElasticSearch [11], для управления логами – Logstash [12], а для отображения метрик – Kibana [13]. Все компоненты также распространяются по свободной лицензии. Одной из ключевых областей применения ELK является управление логами.

Так как все компоненты постоянно обновляются, то, несмотря на наличие готовых реализаций панелей для данных стеков, они нуждаются в дополнительной корректировке администратором.

Установка мониторинг-стека на сервере. Для быстрого развертывания и безопасной связи приложений между собой следует использовать *docker-compose* со следующим конфигурационным файлом:

```
#docker-compose.yml
version: '3.4'
services:
  alertmanager-bot:
    image: metalmatze/alertmanager-bot:0.3.1
    container_name: alertmanager-bot
    environment:
      - ALERTMANAGER_URL=http://alertmanager:9093 #откуда бот получает алерт
      - LISTEN_ADDR=0.0.0.0:8080
      - BOLT_PATH=/data/bot.db
      - STORE=bolt
      # - TELEGRAM_ADMIN=429***** #ваш ID в телеграм (1 админ)
      - TELEGRAM_TOKEN=9760*****:AAFxwZGX2cLCxHY*****Eln_GW8 # токен бота
      - TEMPLATE_PATHS=/templates/default.tpl
    command: --telegram.admin=429***** --telegram.admin=302***** #ID в телеграм
    (несколько админов)
    volumes:
      - /srv/monitoring/alertmanager-bot:/data
    networks:
      - default
  prometheus:
```



```
image: prom/prometheus:latest
container_name: prometheus
volumes:
  - ./prometheus:/etc/prometheus/
command:
  - --config.file=/etc/prometheus/prometheus.yml
ports:
  - 127.0.0.1:9080:9090
links:
  - cadvisor:cadvisor
depends_on:
  - cadvisor
restart: always
networks:
  - default
node-exporter:
image: prom/node-exporter
container_name: node-exporter
volumes:
  - /proc:/host/proc:ro
  - /sys:/host/sys:ro
  - /:/rootfs:ro
command:
  - --path.procfs=/host/proc
  - --path.sysfs=/host/sys
  - --collector.filesystem.ignored-mount-points
  - ^/(sys|proc|dev|host|etc|rootfs/var/lib/docker/containers|
rootfs/var/lib/docker/overlay2|rootfs/run/docker/netns|rootfs/var/lib/docker/aufs)($$|/)
# ports:
#   - 9100:9100 #Можно не пробрасывать. Обращаться по node-exporter:9100
restart: always
deploy:
  mode: global
networks:
  - default
alertmanager:
image: prom/alertmanager
container_name: alertmanager
ports:
  - 127.0.0.1:9083:9093
volumes:
  - ./alertmanager:/etc/alertmanager/
restart: always
command:
  - --config.file=/etc/alertmanager/config.yml
  - --storage.path=/alertmanager
networks:
  - default
cadvisor:
image: google/cadvisor
container_name: cadvisor
volumes:
  - /:/rootfs:ro
  - /var/run:/var/run:rw
  - /sys:/sys:ro
  - /var/lib/docker:/var/lib/docker:ro
# ports:
#   - 8081:8080 #Можно не пробрасывать. Обращаться по cadvisor:8080
restart: always
deploy:
```

```

    mode: global
  networks:
    - default
grafana:
  image: grafana/grafana:7.0.3
  container_name: grafana
  depends_on:
    - prometheus
  ports:
    - 3000:3000
  volumes:
    - ./grafana:/var/lib/grafana
    - ./grafana/provisioning:/etc/grafana/provisioning/
  restart: always
  networks:
    - default
networks:
  default:
    external:
      name: grafana-network

```

Для понимания всех параметров предложенного конфигурационного файла необходимо изучить документацию по структуре *docker-compose.yaml*.

Node Exporter собирает информацию о docker-хосте и не нуждается в настройке.

cAdvisor собирает информацию о docker-контейнерах и не нуждается в настройке.

Prometheus. Данный сервис предназначен для хранения и обработки метрик, поступающих от экспортеров, а также последующей передачи данных другим сервисам.

Контейнерный порт 9090 проброшен на порт 9080 docker-хоста внутренней сети для настройки авторизованного доступа к веб-интерфейсу через сервер *nginx*. Для редактирования файлов конфигурации вне контейнера необходимо использовать следующую настройку:

```

volumes:
  - ./prometheus:/etc/prometheus/

```

Перед запуском всего стека необходимо создать директорию *prometheus* с файлом конфигурации *prometheus.yml*:

```

scrape_configs:
  - job_name: node
    scrape_interval: 5s
    static_configs:
      - targets: ['node-exporter:9100', 'cadvisor:8080']
rule_files:
  - './alerts.yml'
alerting:
  alertmanagers:
    - static_configs:
      - targets: ['alertmanager:9093']

```

Так как все контейнеры находятся в общей docker-сети, то они могут обращаться друг с другом по правилу *service_name:port*.

В параметре *job_name* указывается имя задачи, в параметре *scrape_interval* – через какой промежуток получать метрики, в *targets* – цели, имеющие метрики. В нашем случае это экспортеры метрик docker-хоста и docker-контейнеров, а также *alertmanager*, который принимает оповещения от *prometheus*. Важное замечание – все цели должны иметь *endpoint /metrics*.

В *rule_files* указывается файл конфигурации с правилами, которые *alertmanager*, встроенный в *prometheus*, будет обрабатывать и оповещать соответствующие сервисы (в данном случае – *alertmanager*). Его также необходимо создать в директории *prometheus* перед запуском стека со следующим кодом:

```
#alerts.yml
groups:
- name: Мониторинг состояния Экспортёров
  rules:
  - alert: Экспортёр упал!
    expr: up{job='node'} == 0
    for: 1m
    labels:
      severity: Error
    annotations:
      summary: 'Экспортёр {{$labels.instance}} упал!'
      description: "Tasks Server"
- name: Мониторинг состояния Контейнеров Докера
  rules:
  - alert: Контейнер превысил красную границу использования CPU!
    expr: avg(rate(container_cpu_usage_seconds_total{name=~".+"}[1m])) by (name)
* 100 > 25
    for: 1m
    labels:
      severity: warning
    annotations:
      summary: '{{ $labels.name }} использует слишком много CPU. Используется CPU
{{ humanize $value}}%.'
      description: 'Tasks Server'
  - alert: Контейнер превысил красную границу использования виртуальной памяти!
    expr: sum(container_memory_rss{name=~".+"}) BY (name) > 2e+09
    for: 1m
    labels:
      severity: warning
    annotations:
      summary: '{{ $labels.name }} использует слишком много виртуальной памяти.
Используется Памяти {{ humanize $value}}%.'
      description: 'Tasks Server'
  - alert: Используется более половины ВИРТУАЛЬНОЙ памяти!
    expr: sum(container_memory_rss) / sum(container_memory_rss{name=~".+"}) < 2
    for: 1m
    labels:
      severity: warning
    annotations:
      summary: 'Контейнеры ипользует слишком много ВИРТУАЛЬНОЙ памяти. Использо-
ется Памяти более половины!'
      description: 'Tasks Server'
  - alert: Используется более половины от доступного CPU!
    expr: sum(avg(rate(container_cpu_usage_seconds_total{name=~".+"}[1m])) by
(name)) * 100 > 50
    for: 1m
    labels:
      severity: warning
    annotations:
      summary: 'Контейнеры использует слишком много CPU. Используется CPU {{ hu-
manize $value}}%'
      description: 'Tasks Server'
```

В параметре *name* указывается название оповещения, которое будет отображаться в веб-интерфейсе.

В параметре *alert* – заголовок сообщения, которое приходит в виде уведомления в *telegram*.

В параметре *expr* – выражение, истинность которого приведет к уведомлению об этом администратора. В выражениях используется язык запросов *PromQL*.

Параметр *for* отвечает за промежуток времени между запросами.

В параметрах *summary* и *description* указываются основное сообщение и примечание.

В данном файле конфигураций указаны правила, которые предупреждают администратора о следующих моментах:

- 1) `up{job='node'} == 0` – один из экспортеров (*node-exporter* или *cadvisor*) перестал работать;
- 2) `avg(rate(container_cpu_usage_seconds_total{name=~".+"}[1m])) by (name) * 100 > 25` – один из контейнеров в течение последней минуты использует более 25% от доступного CPU;
- 3) `sum(container_memory_rss{name=~".+"}) BY (name) > 2e+09` – один из контейнеров использует более 2 Гб оперативной памяти;
- 4) `sum(container_memory_rss) / sum(container_memory_rss{name=~".+"}) < 2` – на всей системе контейнерами используется более половины от доступной оперативной памяти;
- 5) `sum(avg(rate(container_cpu_usage_seconds_total{name=~".+"}[1m])) by (name)) * 100 > 50` – на всей системе контейнерами используется более половины от доступного CPU.

Alert Manager. Данный сервис предназначен для вывода оповещений в интерфейс веб-браузера и способен передавать информацию в описанный ранее *Alert Manager Bot*.

Контейнерный порт 9093 проброшен на порт 9083 *docker*-хоста внутренней сети с той же целью, что и порт *prometheus*. Перед запуском стека необходимо создать файл конфигурации в директории *alertmanager* со следующим кодом:

```
#alertmanager.yml
route:
  group_wait: 20s      # Частота
  group_interval: 20s  # уведомлений
  repeat_interval: 60s # в телеграм
  group_by: ['alertname', 'cluster', 'service']
  receiver: alertmanager-bot
receivers:
- name: alertmanager-bot
  webhook_configs:
  - send_resolved: true
    url: 'http://alertmanager-bot:8080'
```

Alert Manager Bot. Данный сервис предназначен для отправки оповещений администратору в *telegram*, возникающих при возникновении определенных заранее событий. Например, это может быть превышение отметки потребления оперативной памяти сервера в 70%.

Переменная окружения `TELEGRAM_ADMIN` контейнера *alertmanager-bot* используется, когда оповещения необходимо отправлять одному администратору. Для их отправки нескольким администраторам используется параметр «`command: --telegram.admin=***** --telegram.admin=*****`», где вместо звездочек указывается ID пользователя *telegram* (чтобы узнать ID пользователя можно использовать *Telegram-bot @getmyid_bot*). Для создания своего бота необходимо использовать *@BotFather*.

Когда выражение, прописанное в *alerts.yml*, становится истинным, на веб-интерфейсе появляется соответствующее предупреждение, которое также отправляется на *alertmanager* (рис. 9).

Grafana. Данный сервис предназначен для визуализации собранных данных, позволяет удобно масштабировать их, выделять необходимый промежуток времени, задавать разные параметры для отображения.

Grafana не нуждается в проксировании через *nginx*, так как имеет встроенную систему авторизации.

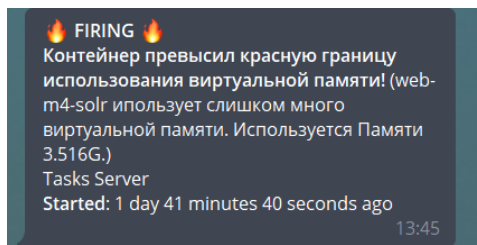


Рис. 9. Пример срабатывания правила и отображения оповещения в telegram

В конечном итоге директория с конфигурационными файлами мониторинг-стека должна иметь такой вид:

```
metrics
├── docker-compose.yml
├── grafana
│   ├── .
│   └── .
├── alertmanager
│   └── config.yml
└── prometheus
    ├── alerts.yml
    └── prometheus.yml
```

После настройки всех файлов конфигураций можно запускать стек командой «*docker-compose up --build -d*».

Файл конфигурации *nginx* выглядит следующим образом:

```
#metrics.conf
server{ #prometheus
    server_name 35.193.60.180;
    location / {
        proxy_pass http://localhost:9080;
    }
    listen 9090;
    auth_basic "Permission denied";
    auth_basic_user_file /etc/nginx/.htpasswd;
}
server{ #alertmanager
    server_name 35.193.60.180;
    location / {
        proxy_pass http://localhost:9083;
    }
    listen 9093;
    auth_basic "Permission denied";
    auth_basic_user_file /etc/nginx/.htpasswd;
}
```

Настройка Dashboards в Grafana. После того, как настройка экспортеров метрик закончена, необходимо визуализировать полученные данные. В первую очередь необходимо настроить источники данных. Для этого во вкладке *Configuration* необходимо выбрать раздел *Data Sources*. Далее необходимо найти и выбрать *Prometheus* и настроить его следующим образом:

Name – произвольное название, из которого будет понятно, какой именно *Prometheus* будет настроен (так как серверов может быть много и на каждом сервере будет свой *Prometheus*);

URL – так как *Grafana* находится в одной *docker*-сети с *prometheus*, то путь до источника данных будет `http://prometheus:9090`.

Остальные настройки остаются по умолчанию. Нажатие «*Save & Test*» выводит уведомление «*Data source is working*». Далее необходимо добавить *Dashboard*. Для этого во вкладке *Create* выбирается раздел *Import*. Необходимо найти подходящую для выполняемых задач *Dashboard*, указав в качестве источника данных *Prometheus*, а в качестве коллектора – *nodeExporter*. При выборе подходящей для задач панели может возникнуть проблема – почти все они имеют устаревшие запросы к источнику данных, вследствие чего необходимо создать свои запросы и сохранить их в *json* формате. Далее в поле «*Import via panel json*» вставляется полученный *json*-файл и все настройки будут импортированы.

Одной из ключевых особенностей *Grafana* является то, что у администратора есть возможность создать переменные и использовать их в определенных панелях. К таким переменным могут относиться IP-адрес отправителя запроса, домен, на который был сделан запрос, конкретный контейнер и т. д. При выборе соответствующей переменной все панели, которые в своих запросах к источнику данных имеют эту переменную, будут отфильтрованы, что значительно упрощает анализ данных. Также есть возможность устанавливать период времени, за который необходимо получить информацию.

Используя данный мониторинг-стек, можно оперативно настроить экспорт данных с любого сервера на сервер *Grafana*. Для этого надо на каждом сервере, мониторинг которого необходим, активировать данный стек без *Grafana*. Для *Prometheus* следует настроить авторизацию, например, через *Nginx*, так как теперь доступ к данным администратор будет получать не по внутренней сети *docker*. В настройках источников данных *Grafana* необходимо добавить соответствующие экспортеры, указав адрес и данные для авторизации. Таким образом, для каждой отдельной *dashboard* достаточно указать, из какого именно источника (сервера) необходимо получать информацию.

На рис. 10 изображены созданные для мониторинга панели с реальными данными, полученными в процессе мониторинга соревнований «VKA-CTF`2020». Также контролировались ресурсы на всех трех серверах с заданиями.

Логирование запросов через Nginx. Для записи всех действий пользователей на веб-сервисах с заданиями и в платформе CTFd рекомендуется использовать логирование через веб-сервер *nginx*. Это может пригодиться для отслеживания моментов большой нагрузки на сервис либо для подтверждения достоверности быстрого решения определенного задания. Для обработки логов *nginx* существует приложение *Graylog* [14].

Установка Graylog на сервере. Установка производится с помощью приведенного ниже конфигурационного файла *docker-compose.yml* следующим образом:

```
- http.host=0.0.0.0
  - transport.host=localhost
  - network.host=0.0.0.0
  - "ES_JAVA_OPTS=-Xms512m -Xmx512m"
ulimits:
  memlock:
    soft: -1
    hard: -1
networks:
```

```
- graylog
graylog:
image: graylog/graylog:3.3
environment:
  # CHANGE ME (must be at least 16 characters)!
```

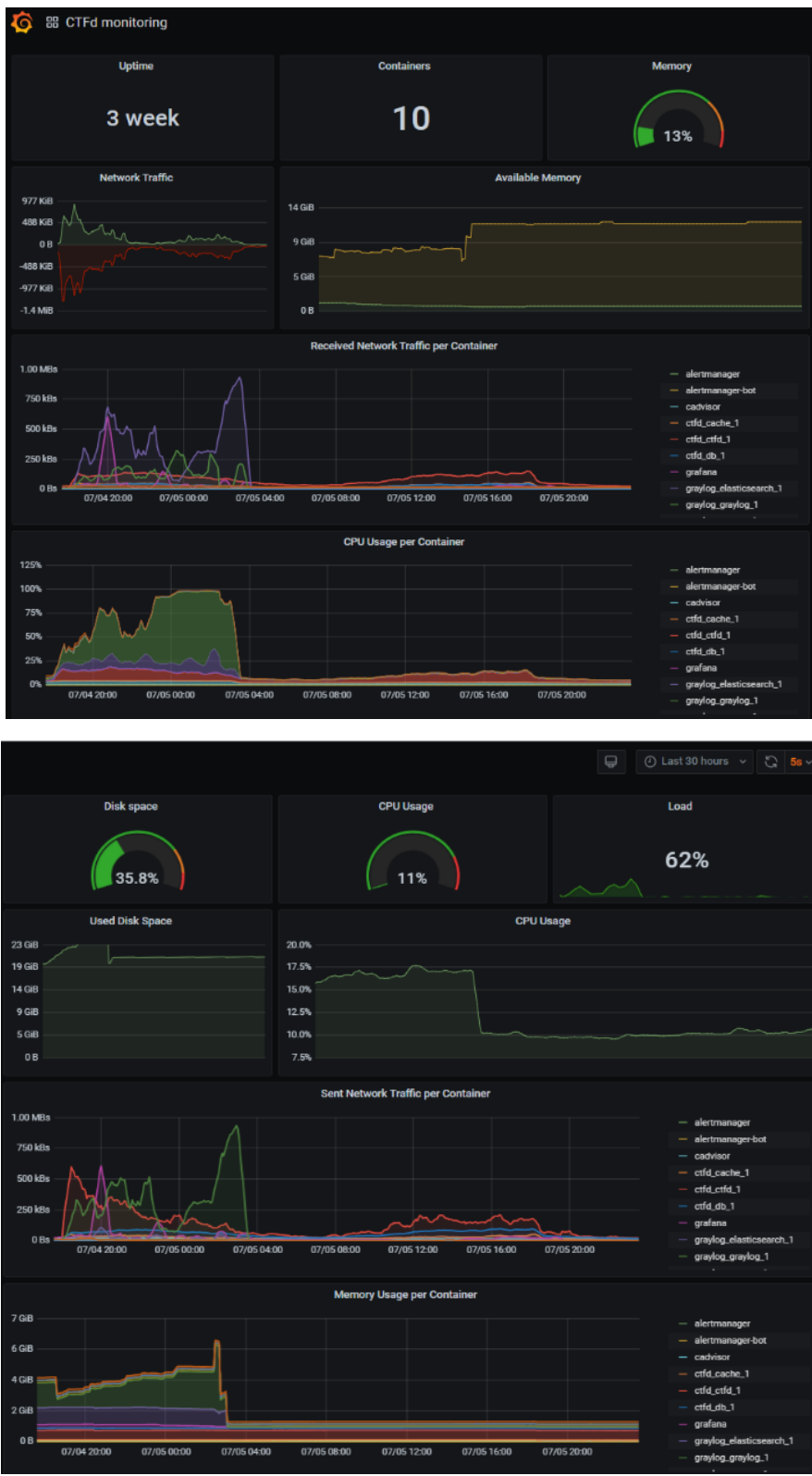


Рис. 10. Мониторинг сервера с платформой CTFd

```

- GRAYLOG_PASSWORD_SECRET= somepasswordpepper
- GRAYLOG_ROOT_PASSWORD_SHA2=
8c6976e5b5410415bde908bd4dee15dfb167a9c873fc4bb8a81f6f2ab448a918
- GRAYLOG_HTTP_EXTERNAL_URI=http://35.193.60.180:9000/
networks:
- graylog
depends_on:
- mongo
- elasticsearch
links:
- mongo:mongo
- elasticsearch:elasticsearch
ports:
- 9000:9000
# Syslog UDP
- 1514:1514/udp
networks:
graylog:
external:
name: grafana-network

```

В данном файле конфигурации необходимо изменить следующие параметры:

GRAYLOG_PASSWORD_SECRET – пароль для входа на веб-интерфейс;

GRAYLOG_ROOT_PASSWORD_SHA2 – sha2 от пароля (используя команду: “echo -n somepasswordpepper | shasum -a 256”);

GRAYLOG_HTTP_EXTERNAL_URI – http://URL:PORT/ сервера

Для того чтобы *Grafana* имела доступ к *elasticsearch* по внутренней docker-сети, следует указать драйвер сети *external* и имя существующей сети *Grafana*.

Настройка Graylog для принятия логов от Nginx серверов. На всех серверах, которые должны отправлять логи веб-приложений, необходимо в конфигурационный файл *nginx.conf* в блоке *http* указать формат отправляемых логов и адрес graylog. Пример кода:

```

log_format graylog2_format '$remote_addr - $host [$time_local] "$request $request_body" $status $request_length "$http_referer" ' "'[UA$http_user_agent]" "$http_x_forwarded_for"
<msec=$msec|connection=$connection|connection_requests=$connection_requests|millis=$request_time> {FROM tasks}';
access_log syslog:server=35.193.60.180:1514 graylog2_format;

```

Формат логов можно задать различными способами, учитывая, что конкретные значения из этой строки будут извлекаться посредством применения регулярных выражений.

Таким образом, можно добавить строки *UA* и *FROM* для более точного поиска конкретных слов.

Далее необходимо настроить веб-интерфейс *graylog*. При входе нужно ввести логин «admin» и указанный в «docker-compose.yml» пароль, в разделе *System* выбрать *Content Packs*, затем нажать на кнопку *Upload* и выбрать подготовленный файл конфигурации *content_pack.json*. После успешной загрузки файла необходимо выбрать его среди других установленных пакетов (*nginx_json_graylog3*). Далее выбрать *Action* и нажать *Install*.

Так как был использован собственный формат хранения логов, то необходимо настроить экстрактор. Следует выбрать *Manage extractors*, затем *Actions*, *Import Extractors* и заготовленный ранее файл *extractors.json*.

Настройка grafana. В *Grafana* необходимо указать *elasticsearch* в качестве источника данных. Во вкладке *Configuration* необходимо выбрать раздел *Data Sources*.

Далее необходимо найти и выбрать *Elasticsearch* и настроить его следующим образом:

Name – произвольное название;

URL – так как *Grafana* теперь находится в одной *docker*-сети с *elasticsearch*, то путь до источника данных будет `http://elasticsearch:9200`.

Остальные настройки следует оставить по умолчанию, нажав далее «*Save & Test*» и, если всё настроено верно, появится уведомление «*Data source is working*».

Теперь осталось добавить *Dashboard*. Для этого во вкладке *Create* необходимо выбрать раздел *Import*. В поле «*Import via panel json*» необходимо вставить сохраненный ранее *json*-файл, после которого все настройки импортируются без ошибок.

Пример атак на инфраструктуру. Приведенный ниже пример иллюстрирует инцидент, возникший при подготовке «*VKA-CTF 2020*» на этапе регистрации пользователей, когда участникам из всей инфраструктуры соревнований была доступна исключительно платформа *CTFd*.

Система мониторинга была настроена в соответствии с вышеприведенным описанием. Одному из администраторов, на которого был настроен *Alert Manager Bot*, поступило сообщение в *telegram* о превышении установленной границы потребления *CPU* в 70% контейнером *CTFd*. На рис. 11 и 12 изображены графики с панели *Grafana*, на которых наглядно видно резкое повышение входящего и исходящего трафиков, а также высокое потребление *CPU* в интервале времени между 14:10 и 14:20.

После изучения других графиков и схем, отображающих зависимость *IP*-адреса отправителя от количества отправляемых запросов, а также сортировки всех данных в порядке убывания, удалось выяснить, что один из пользователей совершил около 13 тысяч запросов на платформу. Причем эти запросы были отправлены не на стандартные страницы, а на *api*, которая была связана с БД. Таким образом, обычные запросы пользователя вызвали множество запросов к БД *MariaDB*, из-за чего нагрузка на сервер резко возросла.

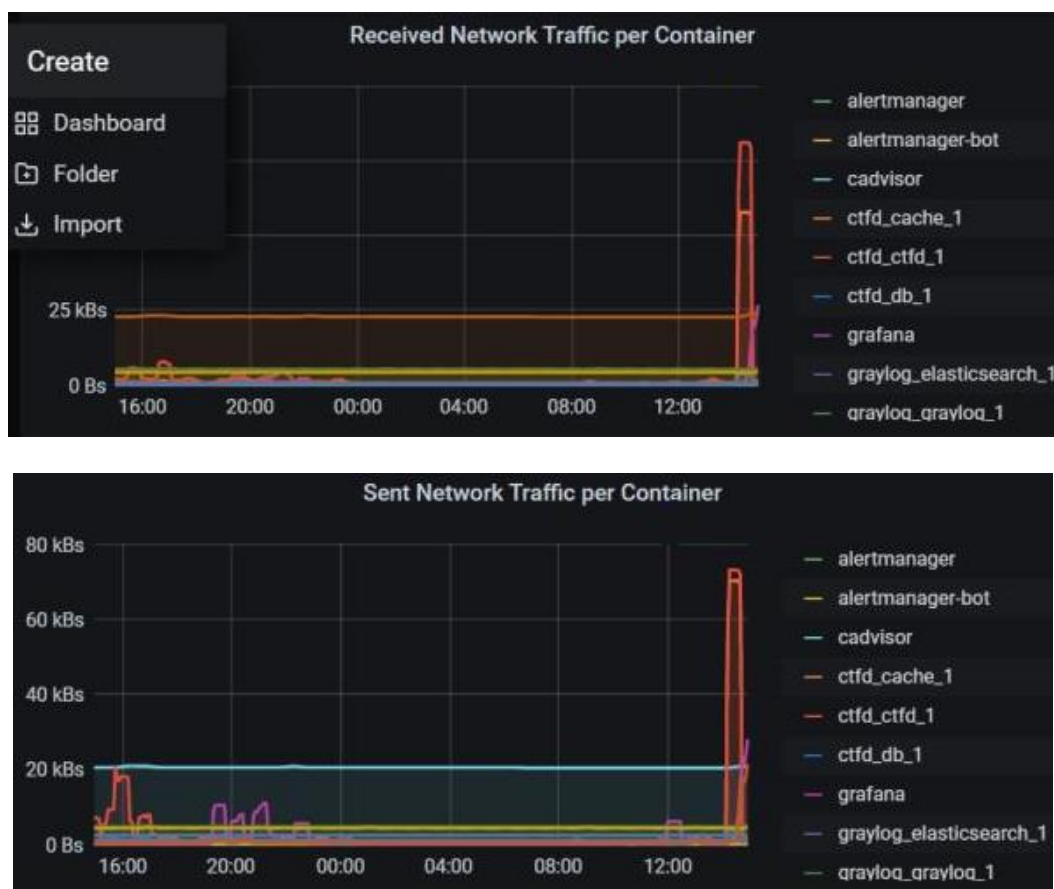


Рис. 11. Графики интенсивности передачи и получения сетевого трафика

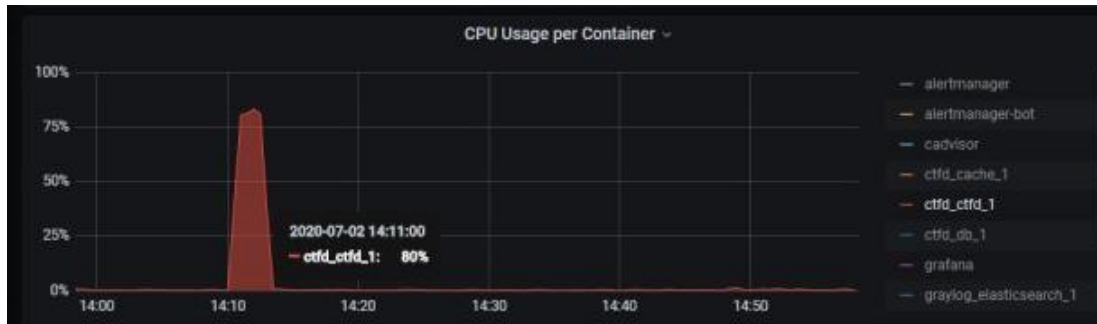


Рис. 12. График потребления CPU

Так как IP-адрес отправителя был известен, и он совпал с IP-адресом, под которым пользователь зарегистрировался на платформе, то удалось узнать игровое имя пользователя и название его команды, используя стандартный функционал CTFd.

Так как объявленные для всех участников правила соревнований запрещают создавать большую нагрузку на платформу (искать директории, использовать сканеры уязвимостей), то организаторами соревнований было сделано публичное предупреждение данной команде. Если бы атака продолжалась, то было бы логичным запретить доступ с данного IP-адреса к серверу любым из доступных методов: веб-сервером *nginx* или веб-файерволом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные теоретические и практические исследования в области подготовки и проведения онлайн-соревнований в области компьютерной безопасности позволили:

- обосновать состав аппаратных и программных средств, совокупность которых позволяет провести соревнования в формате CTF;
- разработать оригинальную систему мониторинга, способствующую своевременному выявлению критического потребления ресурсов и осуществлению балансировки нагрузки, а также автоматическому выявлению атакующих воздействий на инфраструктуру проведения соревнований;
- апробировать предложенные подходы и конкретные решения в ходе проведения соревнований, в которых приняли участие более 120 команд почти из 30 высших учебных заведений страны;
- убедиться на конкретных примерах в практической значимости подсистемы мониторинга;
- определить пригодность предложенного формата проведения соревнований по компьютерной безопасности даже в условиях дистанционного обучения.

Список используемых источников

1. CTFd: репозиторий проекта. – URL: <https://github.com/CTFd/CTFd> (дата обращения: 28.03.2021).
2. Trello: официальный сайт. – URL: <https://trello.com> (дата обращения: 28.03.2021).
3. Unicorn: официальный сайт. – URL: <https://unicorn.org> (дата : 28.03.2021).
4. Docker: официальный сайт. – URL: <https://www.docker.com> (дата обращения: 28.03.2021).
5. Prometheus: официальный сайт. – URL: <https://prometheus.io> (дата обращения: 28.03.2021).
6. Grafana: официальный сайт. – URL: <https://grafana.com> (дата обращения: 28.03.2021).

7. CAdvisor: репозиторий проекта. – URL: <https://github.com/google/cadvisor> (дата обращения: 28.03.2021).
8. Node Exporter: репозиторий проекта. – URL: https://github.com/prometheus/node_exporter (дата обращения: 28.03.2021).
9. Alert Manager: репозиторий проекта. – URL: <https://github.com/prometheus/alertmanager> (дата обращения: 28.03.2021).
10. InfluxDB: официальный сайт. – URL: <https://www.influxdata.com> (дата обращения: 28.03.2021).
11. Elasticsearch: официальный сайт. – URL: <https://www.elastic.co/elastic-stack> (дата обращения: 28.03.2021).
12. Logstash: официальный сайт. – URL: <https://www.elastic.co/logstash> (дата обращения: 28.03.2021).
13. Kibana: официальный сайт. – URL: <https://www.elastic.co/kibana> (дата обращения: 28.03.2021).
14. Graylog: официальный сайт. – URL: <https://www.graylog.org> (дата обращения: 28.03.2021).

И.М. Бурлака;
С.В. Пилькевич,
доктор технических наук

ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКОСТИ КРИПТОГРАФИЧЕСКИХ ХЭШ-ФУНКЦИЙ В ПРИЛОЖЕНИИ К ЗАДАЧАМ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

В статье рассматриваются результаты экспериментального исследования стойкости криптографических хэш-функций применительно к защите парольной информации при задействовании вычислительных систем различной конфигурации. Проведено исследование современных рекомендаций, реализуемых в рамках политики безопасности, которая регламентирует вопросы безопасного создания и хранения паролей, а также влияния трудоемкости хеш-функции на работу информационной системы.

Ключевые слова: криптографическая хэш-функция, парольная информация, словарь, радужная таблица, идентификация пользователя, SSD накопитель.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из традиционных сфер применения хэш-функций являются процедуры идентификации объектов для защиты паролей. Впервые идея хранения паролей в хэш-форме была предложена Робертом Моррисом для операционной системы UNIX [1]. Его алгоритм, известный как сгурт, использовал алгоритм DES и 12-битный случайный вектор для снижения риска перебора пароля по словарю. Данный подход в той или иной форме применяется и в современных информационных системах: администраторы не могут узнать пароли пользователей, но при этом пользователи с помощью своих паролей получают доступ в систему, располагаящую хэшем пароля пользователя.

Взлом пароля является одним из распространенных типов атак на информационные системы, использующие аутентификацию по паролю или паре «имя пользователя-пароль». Суть атаки сводится к завладению злоумышленником паролем пользователя, имеющего право входить в систему. Привлекательность атаки для злоумышленника состоит в том, что при успешном получении пароля он гарантированно получает все права пользователя, учетная запись которого была скомпрометирована. Кроме того, вход под существующей учетной записью обычно вызывает меньше подозрений у системных администраторов.

В данной работе рассматривается ситуация, при которой злоумышленнику удалось перехватить трафик или получить доступ к хранилищу (файлу, базе данных), содержащему хэши паролей. Целью исследования является разработка рекомендаций по выбору пароля, обеспечивающего его стойкость по отношению к взлому и применению нарушителем различных методов криптографического анализа используемой в информационной системе хэш-функции, а также влияние хеш-функции на работу информационной системы.

СОВРЕМЕННЫЕ АТАКИ НА ПАРОЛЬНУЮ ИНФОРМАЦИЮ

В рамках проведенного исследования были рассмотрены следующие виды атак:

1. Метод полного перебора на GPU и CPU.
2. Атака по словарю.
3. Использование радужных таблиц.

Метод полного перебора относится к классу методов поиска решения исчерпыванием всевозможных вариантов. Сложность полного перебора зависит от мощности множества всех

возможных решений задачи. Если пространство решений очень велико, то полный перебор может не дать результатов в обозримом временном интервале. Криптографические атаки, основанные на методе полного перебора, являются наиболее универсальными, но и самыми долгими.

Перебор по словарю является адаптированным вариантом метода полного перебора, осуществляемым относительно сокращенного пространства гипотетических решений – паролей определенного вида и длины, объединенных в словарь по принципу наибольшей частоты использования пользователями.

Радужная таблица представляет собой специальный вариант таблиц поиска для обращения криптографических хэш-функций, использующий механизм разумного компромисса между временем поиска по таблице и занимаемой памятью. Основная идея, эксплуатируемая радужными таблицами, состоит в том, что для всех распространенных и коротких паролей, не содержащих соль, нарушитель может заранее подсчитать значения хэшей и сохранить их в таблице. Это позволяет быстро найти совпадение в заранее сформированной таблице. Но чем длиннее пароль, тем больше таблица и тем больше памяти необходимо для ее хранения. Альтернативным вариантом является хранение только первых элементов цепочек хэшей. В результате требуется больше вычислений для поиска пароля, но значительно уменьшается количество требуемой памяти. Таким образом, радужные таблицы являются улучшенным вариантом данного метода, позволяя избежать коллизий.

Перечисленные виды атак не являются новыми, однако практическая сторона их применения постоянно претерпевает изменения, зачастую значительные.

1. Метод полного перебора хорошо поддается распараллеливанию, что открывает широкие перспективы по применению многопроцессорных вычислительных систем.

2. Результаты анализа многочисленных утечек персональных данных и реквизитов доступа пользователей позволяют формировать актуальные чрезвычайно полные словари, используемые при одноименной атаке.

3. Основные недостатки радужных таблиц – высокая стоимость и большой объем накопителя, используемого для хранения таблиц. Они стремительно нивелируются за счет удешевления оборудования. Кроме того, открываются новые возможности, обусловленные применением передовых технологий хранения данных – переход с HDD на SSD накопителя.

ПРОВЕДЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве базового алгоритма бесключевого преобразования данных использована хэш-функция MD5. Выбор обусловлен простотой ее реализации и своеобразной инвариантностью по отношению к вычислительной платформе, на которой она выполняется.

Тестирование производительности метода полного перебора пароля на CPU и GPU осуществлялось на основе программы, реализованной на языке программирования python. Рассматривалась зависимость времени выполнения операций от длины парольной фразы и от мощности используемого алфавита.

Сравнение динамики изменения параметров для CPU и для GPU дает закономерный результат – большую оперативность вычислений на GPU. Причины этого заключаются в том, что скорость вычисления хэш-функции для CPU примерно в 10 раз меньше, чем у GPU (для CPU 260.9 МН/с, а для GPU 3620.6 МН/с). Вместе с тем CPU не предназначены для решения подобных задач, в отличие от GPU, которые изначально создавались для обработки изображений, где требуется выполнение большого количества простейших операций.

Экспериментальная вычислительная платформа, реализующая возможности GPU, построена на основе видеокарты Nvidia GeForce GTX 960M, выпущенной пять лет назад. Но даже такое, несколько устаревшее, оборудование обладает высокой производительностью (тенденции последних лет показывают ежегодный прирост производительности видеокарт более

чем вдвое). Результаты сравнения скорости криптографических преобразований представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Сравнение скорости выполнения хэш-функций на базе видеокарты
Nvidia GeForce GTX 960M**

№ п/п	Название хэш-функции	Скорость вычисления хэшей, миллионов в секунду	По отношению к MD5
1	MD5	3753.9	1
2	SHA1	1268.6	0.34
3	SHA2-256	452.7	0.12
4	SHA2-512	153.1	0.04
5	NTLM	6799.2	1.81
6	LM	3823.0	1.02
7	bcrypt	0.001773	47230
8	ГОСТ Р 34.11-2012	2.7694	1355

Таким образом, данные по производительности, полученные для различных хэш-функций, могут быть сопоставлены и, при необходимости, конвертированы друг в друга. Вместе с тем с увеличением трудоемкости хэш-функции увеличивается время обработки каждой авторизации в систему. Поэтому требуется более мощное оборудование, чтоб уменьшить это влияние.

Специфика атаки по словарю состоит в том, что такой метод использует своеобразную уязвимость системы защиты информации, обусловленную человеческим фактором. Пользователи предпочитают применять короткие семантически окрашенные пароли, им свойственно лениться и редко менять пароли. В результате имеется возможность составления баз данных наиболее часто используемых паролей – так называемых словарей.

Время перебора указанным методом существенно меньше, чем методом полного перебора. Например, самый популярный словарь *rockyou* содержит 14 344 391 слов, а размер словаря, состоящего из всех слов длиной шесть символов и с алфавитом из 63 букв, равен 62 523 502 209 слов. Фактография исследований, проводимых на протяжении последних 30 лет [2–5], показывает, что процент встречаемости паролей в словарях превышает 30%.

Программа *RainBowCrack* представляет собой одну из наиболее удачных современных реализаций метода, использующего радужные таблицы. Как и в предыдущих случаях, критичными для объема памяти, занимаемого таблицей, являются длина слов и размер алфавита.

Для взлома сложных паролей (длиной более 10 символов при 100 символах в алфавите) требуется большой объем таблицы (более 10 ТБ). Но это намного меньше, чем простая таблица хэшей паролей (более 86 ТБ). Отметим, что применение данного метода требует определенного объема оперативной памяти, так как туда осуществляется отображение фрагментов таблиц с жесткого диска компьютера. Это обстоятельство приводит к тому, что большое количество времени уходит на загрузку данных с диска (около 98% времени работы программы).

Представляется, что оперативность выполнения сортировки и поиска можно увеличить за счет использования SSD вместо HDD. Для проверки этой гипотезы был проведен вычислительный эксперимент. В качестве исходных данных использованы радужные таблицы [6] для алфавита из 25 символов с максимальной длиной 9 символов, и набор из шести хэшей, выбранных таким образом, чтобы один из них не содержался в таблицах. Это позволяет измерить максимальное время работы и задействованный объем памяти (табл. 2).

Таблица 2

Сравнение параметров работы радужных таблиц на SSD и HDD

Параметры работы метода	Тип устройства хранения данных	
	HDD	SSD
Полное время перебора, сек.	846.03	267.99
Время прохождения цепи, сек.	53.14	52.86
Время чтения с устройства (диска), сек.	840.61	250.28
Количество цепочек хешей, сек.	6498700000	
Скорость чтения цепочек хешей, миллионов в секунду	13.17	12.29

Основные параметры примерно одинаковы, за исключением времени чтения информации с носителя. Скорость работы на SSD увеличилась в 3 раза, что существенно улучшило результат - 267.99 секунд против 846.03 секунд.

СПОСОБЫ ЗАЩИТЫ ПАРОЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ ОТ КРИПТОГРАФИЧЕСКИХ АТАК

Из анализа методов можно сделать вывод, что для восстановления пароля самым быстрым является метод атаки по словарю, но он относится к классу вероятностных. Поэтому для однозначного получения результата лучше всего использовать метод полного перебора на GPU либо радужные таблицы. На практике реализация каждого из этих подходов потребует существенных финансовых затрат (618 млн. рублей за систему хранения данных для радужных таблиц или ASIC-майнеры для полного перебора на GPU). В то же время, если нарушитель располагает достаточным временем (более 46 ч) для проведения атаки, то доступность оборудования и осуществление атакующих воздействий становятся вполне реальными. В результате возникает необходимость разрабатывать новые способы защиты от подобных видов атак.

Защита парольной информации базируется на грамотном выборе политики безопасности, регламентирующей вопросы создания и хранения паролей. В настоящее время наиболее актуальными являются следующие рекомендации:

1. Использование криптографически стойких хэш-функций (например, SHA-3 или ГОСТ Р 34.11-2012). При выборе более трудоемкой хеш-функции также возрастает требование к оборудованию либо увеличивается время отклика от информационной системы. Для того чтобы не было такой проблемы требуется выбирать оптимальную хеш-функцию, которая обеспечит защиту и не будет перегружать систему.

2. Использование соли – подход, предполагающий увеличение пароля путем присоединения к нему (в начало или конец) случайной символьной последовательности, которая удлиняет пароль, а также делает его нетипичным. Таким образом, можно обезопасить информационную систему от словарной атаки и от атаки с использованием радужных таблиц. Кроме того, это увеличивает время для метода полного перебора. Отметим, что нельзя использовать короткую и повторяющуюся соль.

3. Использование сложных и нетипичных паролей.

4. Неоднократное использование хэш-функции (также с использованием соли) и/или комбинирование различных хэш-функций, например: md5(sha1(пароль)); md5(md5(соль) + md5(пароль)); sha1(str_rot13(пароль + соль)); md5(sha1(md5(md5(пароль) + sha1(пароль)) + md5(пароль))).

Отдельного рассмотрения заслуживают изменения в рекомендациях NIST для политик безопасности [7]:

- 1) отказ от частой смены пароля, так как пользователи часто забывают пароли либо пишут их на бумаге и оставляют на рабочем месте;
- 2) проверка отсутствия пароля в базах данных популярных паролей;
- 3) отсутствие ограничений на использование любых символов в пароле;
- 4) использование парольной фразы вместо одного слова (комбинации символов), например, пароль из четырех случайных слов «рыба стол насос слон».

Приведенные способы защиты не смогут обезопасить систему на 100%, но значительно усложнят процедуру подбора пароля злоумышленником.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные методы по восстановлению паролей продолжают совершенствоваться – прогресс в данной области обусловлен, главным образом, развитием программных и аппаратных технологий, а не прорывными достижениями криптографического анализа.

Стоимость оборудования, необходимого для преодоления процедур идентификации объектов, неуклонно снижается, и оно становится доступным для широкого круга злоумышленников. Поэтому необходимо использовать современные методы защиты паролей и внимательно строить политику безопасности, опираясь на изложенные выше рекомендации.

Список используемых источников

1. *Morris R., Grampp F.T.* UNIX Operating System Security // AT&T Bell Laboratories Technical Journal, 63, part 2, #8. – October 1984. – P. 1649–1672.
2. The memorability and security of passwords – some empirical results / J. Yan [et al.] // Technical reports published by the University of Cambridge Computer Laboratory, September 2000. – URL: <https://www.cl.cam.ac.uk/techreports/UCAM-CL-TR-500.pdf> (дата обращения: 20.04.2021).
3. *Spafford E.H.* Observations on reusable password choices. In Proceedings of the 3rd Security Symposium. Usenix. – September 1992. – URL: <http://ftp.cerias.purdue.edu/pub/papers/genspafford/spaf-OPUS-observe.pdf> (дата обращения: 20.04.2021).
4. *Hunt T.* The 773 Million Record "Collection #1" Data Breach // www.troyhunt.com. – January 2019. – URL: <https://www.troyhunt.com/the-773-million-record-collection-1-data-reach/> (дата обращения: 20.04.2021).
5. *Klein D.V.* Foiling the cracker: A survey of and improvements to password security // Programming and Computer Software. – 1992. – № 17.
6. Distributed RainbowTable Project «Free Rainbow Tables». – URL: <https://freerainbowtables.com/> (дата обращения: 20.04.2021).
7. NIST Special Publication 800-63C Digital Identity Guidelines. – URL: <https://pages.nist.gov/800-63-3/sp800-63c.html/> (дата обращения: 20.04.2021).

В.М. Зима,
кандидат технических наук, доцент;
Р.О. Крюков,
кандидат технических наук

ИНТЕГРАЦИЯ РАЗНОТИПНЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ И СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ДОСТУПА К СОВМЕСТНЫМ РЕСУРСАМ ЕДИНОЙ ГЕТЕРОГЕННОЙ СЕТИ

Представлен практический подход к безопасной интеграции разнотипных автоматизированных систем и средств защиты информации для контроля доступа пользователей к совместным ресурсам формируемой единой гетерогенной сети на основе сервис-ориентированной архитектуры с реализацией встроенного диспетчера доступа и адаптеров безопасности межсистемного взаимодействия.

Ключевые слова: компьютерная безопасность, безопасность информации, средства защиты информации от несанкционированного доступа, безопасная интеграция разнотипных автоматизированных систем, сервисная шина, диспетчер доступа, адаптеры безопасности межсистемного взаимодействия, агенты интеграции средств защиты информации, электронная подпись.

ВВЕДЕНИЕ

При формировании единой гетерогенной сети (ЕГС) крупного предприятия или ведомства возникает актуальная задача интеграции разнотипных автоматизированных систем (АС) и средств защиты информации от несанкционированного доступа (СрЗИ) для контроля доступа пользователей к распределенным совместным ресурсам ЕГС. Актуальность данной задачи объясняется несовместимостью СрЗИ, связанной прежде всего с отсутствием механизмов поддержания единых мандатных меток и списков контроля доступа по отношению к атрибутам пользователей и процессов (учетным записям, их реквизитам, маркерам доступа процессов и др.), а также атрибутам объектов доступа (файлам, элементам баз данных, документам, сообщениям, функциям специального программного обеспечения, СПО). Это, в свою очередь, не позволяет реализовать унифицированный контроль доступа к информационным ресурсам, распределенным по разнотипным АС из состава ЕГС.

Для решения данной задачи целесообразно реализовать безопасную интеграцию разнотипных АС и СрЗИ, позволяющую обеспечить унифицированный и централизованный контроль доступа пользователей к распределенным совместным ресурсам ЕГС. Такая безопасная интеграция возможна на основе следующих подходов:

1) разделение (изолирование друг от друга) контуров обработки и хранения информации по грифам секретности (НС, ДСП, С, СС). Это ведет к избыточности средств вычислительной техники (СВТ) и финансовым затратам, а также не позволяет в полной степени достигнуть унифицированного контроля доступа к совместным ресурсам АС ЕГС и централизованного управления едиными мандатными метками и списками контроля доступа. Кроме того, разделение контуров обработки и хранения информации по грифам секретности приводит к сложности, а в ряде случаев – к невозможности информационного взаимодействия между этими контурами;

2) использование сервис-ориентированной архитектуры (Service-Oriented Architecture, SOA) для построения интегрированной системы защиты информации (СЗИ) ЕГС.

Второй подход лишен недостатков первого и ориентирован на поддержку совместного и повторного использования типовой функциональности по защите распределенной информации, оформленной в виде доступных по сети сервисов безопасности. Сервисы могут исполь-

зоваться в качестве посредников для реализации унифицированного контроля доступа. Новые приложения СрЗИ могут быть созданы путем обнаружения и композиции существующих сервисов безопасности. Функциональность сервиса безопасности может одновременно использоваться в контексте сразу нескольких приложений защиты. Кроме того, при выполнении запросов один сервис безопасности может использовать функциональность других сервисов.

Рассмотрим практический подход к безопасной интеграции разнотипных АС и СрЗИ для унифицированного и централизованного контроля доступа пользователей к совместным ресурсам формируемой ЕГС на основе сервис-ориентированной архитектуры.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Использование сервис-ориентированной архитектуры (SOA) для построения СрЗИ является и одной из основных современных тенденций в развитии систем информационной безопасности, предполагающей переход к реализации 10-уровневой эталонной модели взаимодействия открытых систем (Open Systems Interconnection, OSI) в системах безопасности современных АС (рис. 1), основанной на SOA. Межсистемное взаимодействие относят к 9-му уровню модели OSI.

OSI Layer	Deployment Layer	SOA / OSA
10: Government	User Layer	SOA
9: Organization		
8: Individual		
7: Application	Services Layer	
6: Presentation	Middleware Layer	
5: Session		
4: Transport	Operating System Layer	
3: Network		
2: Data-Link		
1: Physical	Hardware Layer	

Рис. 1. Переход к реализации 10-уровневой эталонной модели взаимодействия открытых систем (Open Systems Interconnection, OSI) в системах безопасности современных АС

Применение SOA для построения интегрированной системы защиты информации ЕГС предполагает совместное использование нескольких механизмов.

1. Для взаимодействующих АС – безопасная интеграция на базе сервисной шины (Enterprise Service Bus, ESB) с реализацией встроенного диспетчера доступа и адаптеров безопасности межсистемного взаимодействия.

2. Для интеграции разнотипных СрЗИ и унифицированного контроля доступа пользователей разных АС к совместным информационным ресурсам ЕГС – использование центра безопасности и промежуточного (связующего) программного обеспечения (middleware) – агентов интеграции СрЗИ.

3. Использование электронной подписи при безопасной интеграции разнотипных АС, обеспечивающей валидацию поступающих сообщений и атрибутов безопасности, а также аутентификацию конечных точек подключения и запросов на взаимодействие.

БЕЗОПАСНАЯ ИНТЕГРАЦИЯ РАЗНОТИПНЫХ АС НА БАЗЕ СЕРВИСНОЙ ШИНЫ

Интеграция разнотипных АС на базе сервисной шины (ESB) с реализацией встроенного диспетчера доступа и адаптеров безопасности межсистемного взаимодействия требует использования следующих функциональных компонентов (рис. 2):

1) шины ESB, выступающей в качестве посредника безопасного информационного обмена для взаимодействующих АС, подключаемых к шине по коммуникационной инфраструктуре через адаптеры безопасности межсистемного взаимодействия;

2) адаптеров безопасности межсистемного взаимодействия, функционирующих вместе с сервисной шиной и реализующих интерфейс безопасного взаимодействия с АС, подключенных к сервисной шине;

3) центра безопасности, отвечающего за централизованное управление сервисной шиной, СрЗИ, а также контролем доступа пользователей к распределенным совместным ресурсам ЕГС.

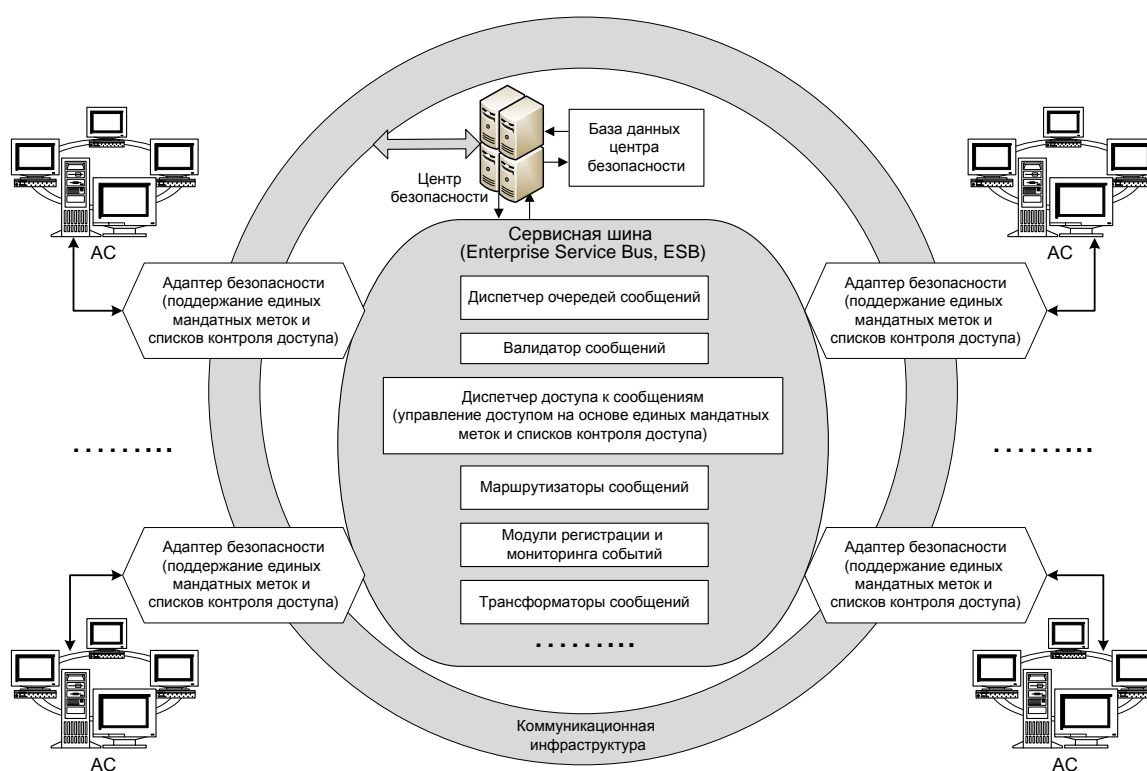


Рис. 2. Схема безопасной интеграции разнотипных АС ЕГС на базе сервисной шины ESB с реализацией встроенного диспетчера доступа и адаптеров безопасности межсистемного взаимодействия

Сервисная шина (ESB), выступающая в качестве посредника безопасного информационного обмена для взаимодействующих АС, должна обеспечивать выполнение следующих функций:

– валидацию сообщений, предполагающую аутентификацию конечных точек подключения (Endpoint) взаимодействующих АС, запросов на взаимодействие, а также проверку подлинности поступающих сообщений (реализует валидатор сообщений);

– управление доступом к адаптерам интеграции и конечным точкам подключения взаимодействующих АС на основе единых мандатных меток и списков контроля доступа (реализует диспетчер доступа к сообщениям);

- управление системой очередей сообщений, выполняющей различные функции обмена сообщениями: обмен сообщениями по моделям отправитель-получатель (sender-receiver), издатель-подписчик (publish-subscribe), синхронный обмен (request-response), персистентные сообщения (persistent message), поддержку транзакций, включая распределенные XA-транзакции (реализует диспетчер очередей сообщений);
- маршрутизацию сообщений внутри сервисной шины между адаптерами и обработчиками, обеспечивающую доставку сообщений до зарегистрированных обработчиков (сервисов) и конечных точек подключения взаимодействующих АС, обеспечивая качество сервиса (реализуют маршрутизаторы сообщений);
- регистрацию и мониторинг событий информационной безопасности (обеспечивают модули регистрации и мониторинга событий);
- трансформацию сообщений – преобразование из одного формата в другой, а также дополнение содержимого сообщений реквизитами безопасности или другой информацией, такой, как, например, дополнительные метаданные о подписчике для обеспечения взаимодействия зарегистрированных провайдеров сервисов (реализуют трансформаторы сообщений) и ряд других функций.

Адаптеры безопасности межсистемного взаимодействия функционируют вместе с сервисной шиной и реализуют интерфейс безопасного взаимодействия с конечными точками подключения АС (Endpoint), подсоединенных к сервисной шине. Для реализации унифицированного и централизованного контроля доступа пользователей к распределенным совместным ресурсам ЕГС адаптеры безопасности должны обеспечивать выполнение следующих функций:

- для входящих сообщений – получение и преобразование информации от исходящей конечной точки подключения АС об учетной записи, от имени которой приходит сообщение, уровне сессии (НС, ДСП, С, СС), а также мандатных метках и списках контроля доступа передаваемых файлов и других элементов данных к универсальным форматам для поддержания единых мандатных меток и списков контроля доступа;
- для исходящих сообщений – преобразование информации в универсальном формате об учетной записи, от имени которой пришло сообщение, уровне сессии (НС, ДСП, С, СС), а также мандатных метках и списках контроля доступа передаваемых файлов и других элементов данных к форматам получателя (входящей конечной точки подключения АС).

Таким образом, сервисная шина вместе с адаптерами безопасности межсистемного взаимодействия, функционирующими под управлением центра безопасности, обеспечивают унифицированный и централизованный контроль доступа пользователей к распределенным совместным ресурсам ЕГС. Это осуществляется за счет управления информационными потоками между АС (контроля доступа к конечным точкам подключения взаимодействующих АС) и передачи вместе с элементами данных их атрибутов (уровня сессии, мандатных меток и списков контроля доступа) для использования СрЗИ в сопрягаемых системах.

Однако для получения адаптером безопасности сервисной шины через входящие сообщения атрибутов безопасности передаваемых элементов данных (их уровня сессии, мандатных меток и списков контроля доступа) необходимо, чтобы на исходящей конечной точке подключения АС функционировал агент интеграции СрЗИ, отвечающий за дополнение передаваемых сообщений и элементов данных атрибутами безопасности, включая электронную подпись. Это связано с тем, что существующие СрЗИ не адаптированы к межсистемному взаимодействию и, соответственно, не обеспечивают в полной мере передачу атрибутов безопасности сообщений и связанных с ними элементов данных при обмене информацией между АС. Поэтому для построения интегрированной системы защиты информации ЕГС на основе сервис-ориентированной архитектуры (SOA) помимо использования сервисной шины с реализацией встроенного диспетчера доступа и адаптеров безопасности межсистемного взаимодействия следует задействовать промежуточное (связующее) программное обеспечение (middleware) – агентов интеграции СрЗИ.

УНИФИЦИРОВАННЫЙ КОНТРОЛЬ ДОСТУПА К СОВМЕСТНЫМ ИНФОРМАЦИОННЫМ РЕСУРСАМ ЕГС НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЦЕНТРА БЕЗОПАСНОСТИ И АГЕНТОВ ИНТЕГРАЦИИ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ

Полноценная безопасная интеграция разнотипных АС и унифицированный контроль доступа пользователей разнотипных АС к совместным информационным ресурсам ЕГС возможны при совместном использовании сервисной шины (ESB) и промежуточного (связующего) программного обеспечения (middleware) – агентов интеграции СрЗИ.

Унифицированный контроль доступа пользователей разнотипных АС к совместным информационным ресурсам ЕГС на основе использования агентов интеграции СрЗИ требует использования следующих функциональных компонентов (рис. 3):

1) агентов интеграции СрЗИ, установленных на автоматизированных рабочих местах (АРМ) и серверах для поддержания единых мандатных меток и списков контроля доступа, а также управления СрЗИ, установленных на этих же компьютерах;

2) центра безопасности, отвечающего за централизованное управление агентами интеграции, СрЗИ, сервисной шиной, а также контролем доступа пользователей к распределенным совместным ресурсам АС ЕГС.

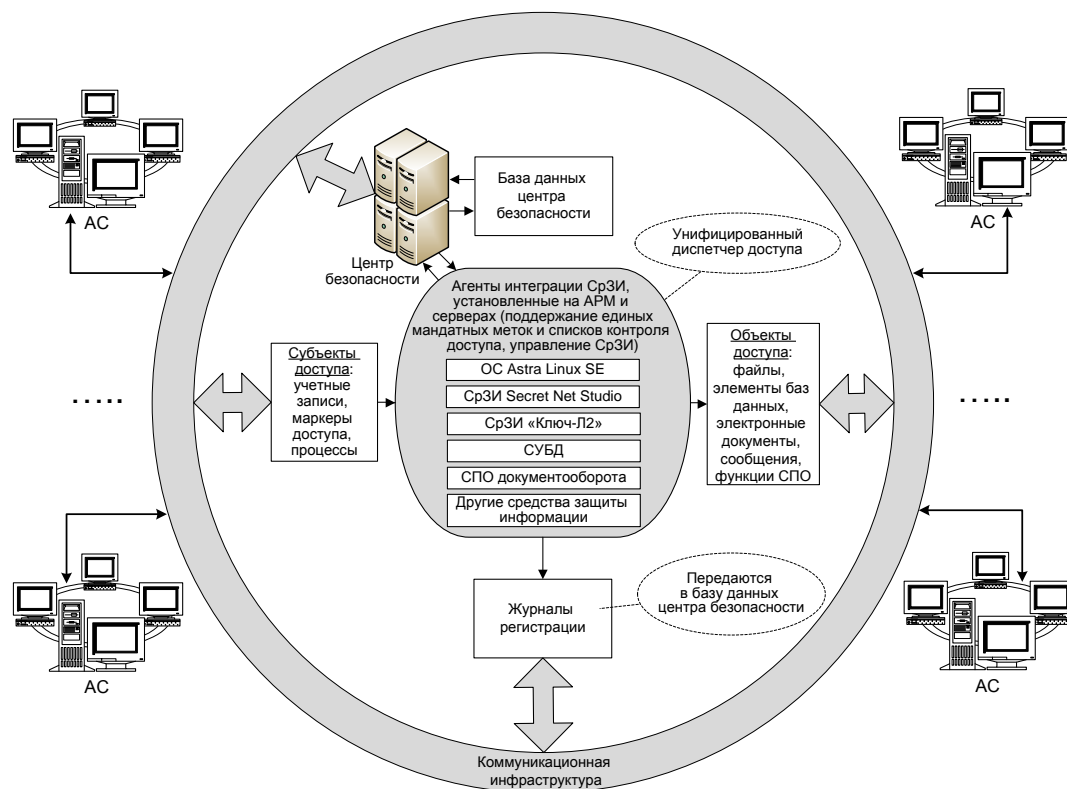


Рис. 3. Схема унифицированного контроля доступа пользователей разнотипных АС к совместным информационным ресурсам ЕГС на основе использования агентов интеграции СрЗИ

Использование агентов интеграции СрЗИ может быть реализовано в двух вариантах (рис. 4).

1. *Минимальный функционал* – агент интеграции устанавливается на исходящих конечных точках подключения АС к сервисной шине, а также АРМ, с которых пользователи осуществляют доступ к совместным информационным ресурсам ЕГС. В этом случае обязательной функцией агента интеграции является дополнение передаваемых в другую АС запросов, со-

общений и элементов данных атрибутами безопасности (их уровнем сессии, мандатными метками и списками контроля доступа), а также электронной подписью. Кроме того, агент интеграции может собирать и передавать в центр безопасности информацию о состоянии управляемого объекта, например, выполнять агрегацию сведений о событиях из журналов аудита и отправлять их в центр безопасности.

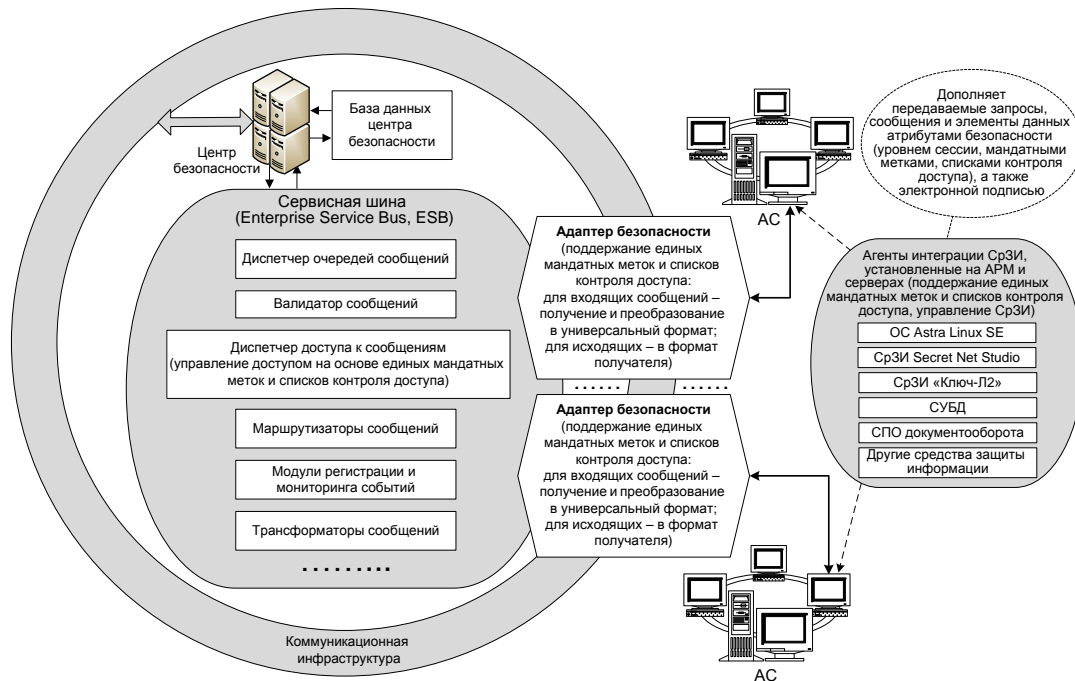


Рис. 4. Схема взаимодействия агентов интеграции СрЗИ с адаптерами безопасности сервисной шины

2. *Максимальный функционал* – агент интеграции устанавливается на исходящих конечных точках подключения АС к сервисной шине, а также на всех АРМ и серверах взаимодействующих АС. В этом случае, помимо обязательной функции дополнения передаваемых в другую АС запросов, сообщений и элементов данных атрибутами безопасности (их уровнем сессии, мандатными метками и списками контроля доступа), а также электронной подписью, может предоставлять интерфейсы управления установленными СрЗИ, защитными механизмами ОС и доступом субъектов к объектам с помощью единых мандатных меток и списков контроля доступа (Access Control List, ACL), обеспечивая выполнение следующих функций:

- агрегации сведений о событиях из журналов аудита по универсальному протоколу взаимодействия;

- выполнения команд администратора по управлению учетными данными пользователей;
- приема управляющих команд от центра безопасности;
- контроля единых мандатных меток и обеспечения их неизменности;
- получения и применения единого списка контроля доступа.

Центр безопасности при использовании агентов интеграции с минимальным функционалом должен обеспечить централизованное управление параметрами взаимодействия агентов с адаптерами безопасности сервисной шины, а также самой сервисной шиной. При установке агентов интеграции с максимальным функционалом центр безопасности может использоваться для единого управления доступом пользователей к распределенным совместным ресурсам АС ЕГС и выполнения следующих функций:

- управления учетными записями пользователей в различных средах – ОС, СУБД, СрЗИ, СПО, включая их синхронизацию при невозможности создания доверительных отношений;
- сбора, хранения и отображения событий, а также генерации отчетов для администратора

по задаваемым критериям; обработки журналов регистрации ОС, СУБД, СРЗИ, средств антивирусной защиты (САВЗ), межсетевых экранов (МЭ), СПО;

– управления параметрами функционирования СРЗИ, САВЗ, МЭ, защитными механизмами ОС, СУБД, СПО;

– обеспечения неизменности мандатных меток, назначенных файлам, документам и другим элементам данных;

– управления доступом субъектов (учетных записей пользователей, групп, ролей) к объектам (функционалу СПО, документам, файлам, хранящимся в сетевых хранилищах данных (СХД), информации, хранящейся в СУБД) с помощью единого списка контроля доступа (ACL);

– объединения серверов под управлением различных ОС в серверную группировку посредством доверительных отношений между агентами интеграции.

ТЕХНОЛОГИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСИ ПРИ БЕЗОПАСНОЙ ИНТЕГРАЦИИ РАЗНОТИПНЫХ АС

Для безопасной интеграции АС и СРЗИ ЕГС на базе сервисной шины и агентов интеграции СРЗИ важную роль играет валидация сообщений, предполагающая не только аутентификацию конечных точек подключения взаимодействующих АС и запросов на взаимодействие, но и проверку электронной подписи (ЭП) поступающих сообщений и атрибутов безопасности, которую должен формировать агент интеграции. Без электронной подписи возможна подделка атрибутов безопасности, что приведет к компрометации СЗИ ЕГС. Кроме того, необходимо учитывать, что в ЕГС электронная подпись необходима для взаимодействия с другими ведомствами.

Для использования электронной подписи следует осуществить создание и поддержку программно-технического комплекса электронной подписи (ПТК ЭП), который включает:

– инфраструктуру управления ключами электронной подписи и цифровыми сертификатами (сертификатами открытых ключей);

– средства формирования и проверки электронной подписи, интегрированные в специальное программное обеспечение (СПО ЭП).

По требованиям ФСБ России при сертификации ПТК ЭП электронной подписи должны быть сертифицированы также все АРМ и серверы, на которых используется электронная подпись.

В связи со сложностью, а в ряде случаев и невозможностью сертификации по требованиям ФСБ РФ всех АРМ и серверов ЕГС, целесообразно ввести два отдельных контура электронной подписи (ЭП), не связанных друг с другом каналобразующей аппаратурой:

– контур юридически значимой ЭП для обмена подписанными документами с внешними структурами (организациями и ведомствами), сертифицируемый по требованиям ФСБ РФ;

– внутренний контур ЭП для формирования и проверки электронной подписи служебных документов и информационных сообщений ЕГС, сертифицируемый по требованиям ФСТЭК России или МО РФ.

Указанное решение соответствует требованиям федерального закона «Об электронной подписи» № 63-ФЗ от 2011 года:

– контур юридически значимой ЭП обеспечит работу с усиленной квалифицированной электронной подписью;

– внутренний контур ЭП – с усиленной неквалифицированной электронной подписью.

В состав ПТК ЭП должны входить следующие средства:

– сервер удостоверяющего центра (УДЦ), который устанавливается на выделенном автономном АРМ или сервере на базе подсистемы криптографической защиты информации удостоверяющего центра (ПКЗИ УДЦ);

- АРМ криптоменеджера на базе подсистемы криптографической защиты информации (ПКЗИ) ЭП, также являющийся автономным и предназначенный для генерации ключей ЭП (ключей формирования и проверки электронной подписи);
- сервер распределения (раздачи) сертификатов (СРС), который устанавливается на выделенном АРМ или сервере на базе криптографического программного обеспечения «Сервер раздачи сертификатов» (КПО СРС);
- АРМ электронной подписи (ЭП) на базе ПКЗИ ЭП, предназначенный только для выполнения функций формирования и проверки ЭП;
- АРМ с программным клиентом электронной подписи (КЭП), обеспечивающий работу с ЭП, в качестве которого выступает каждый реальный и виртуальный АРМ и сервер ЕГС, на котором предполагается использование ЭП.

Функции сервера УДЦ, обеспечивающего формирование сертификатов открытых ключей ЭП и списка отозванных сертификатов, а также АРМ криптоменеджера, осуществляющего генерацию открытых и закрытых ключей ЭП, используются не только в контуре юридически значимой ЭП, но и во внутреннем контуре. Передача сертификатов открытых ключей ЭП и списка отозванных сертификатов выполняется только на учетных машинных носителях информации (МНИ) администратора безопасности. Закрытые ключи ЭП после их генерации помещаются на учетные грифованные МНИ пользователей и должны храниться только на этих МНИ. Обмен электронными документами между контуром юридически значимой ЭП и внутренним контуром ЭП также выполняется только на учетных МНИ.

Схема размещения и использования компонентов ПТК электронной подписи представлена на рис. 5.

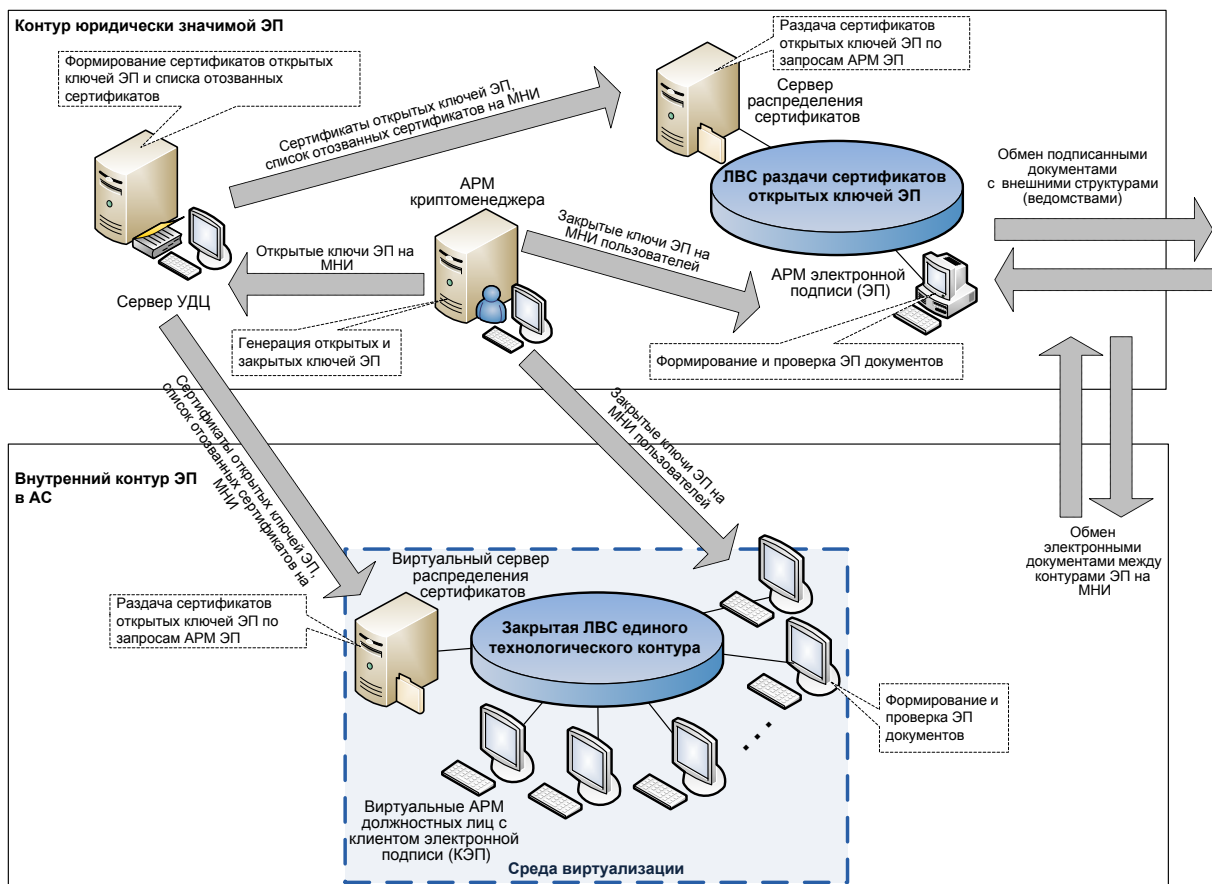


Рис. 5. Схема размещения и использования компонентов ПТК электронной подписи

Для возможности использования ЭП должны быть сгенерированы закрытые (секретные) и открытые ключи ЭП пользователей и УДЦ, а также сформированы сертификаты открытых ключей ЭП, каждый из которых представляет собой открытый ключ ЭП вместе с его рекви-

зитами (информацией о владельце, сроке действия и др.), подписанный секретным ключом УДЦ. Кроме того, чтобы исключить использование скомпрометированных или недействительных ключей ЭП, должен сформироваться и поддерживаться в актуальном состоянии список отозванных сертификатов (Certificate Revocation List, CRL), подписанный по другому секретному ключу УДЦ. Сертификаты открытых ключей ЭП, а также список отозванных сертификатов должны распределяться среди пользователей, использующих ЭП.

Генерация закрытых (секретных) и открытых ключей ЭП пользователей выполняется администратором безопасности на АРМ криптоменеджера в контуре юридически значимой ЭП на основе специальных исходных последовательностей для генерации ключей ЭП (ключевых блокнотов), поставляемых федеральным центром изготовления ключей по действующим временным тактико-техническим требованиям (ВТТТ). После генерации каждый закрытый (секретный) ключ ЭП пользователя помещается на его учетный грифованный МНИ и должен храниться только на этом МНИ и использоваться только этим пользователем.

Сгенерированные открытые ключи ЭП пользователей, подписанные по их секретным ключам, помещаются на МНИ администратора безопасности и переносятся на сервер УДЦ для формирования сертификатов открытых ключей ЭП.

Формирование сертификатов открытых ключей ЭП, а также создание и обновление списка отозванных сертификатов выполняются администратором безопасности на сервере УДЦ. Вместе с тем администратором безопасности на сервере УДЦ выполняется генерация двух пар (закрытого и открытого) ключей ЭП УДЦ: одной пары – для формирования ЭП УДЦ и проверки этой ЭП под сертификатами открытых ключей пользователей, второй пары – для формирования ЭП УДЦ и проверки этой ЭП под списком отозванных сертификатов.

Для каждого открытого ключа ЭП пользователя проверяется его подпись, сформированная по его секретному ключу, и формируется сертификат этого открытого ключа, представляющий собой сам этот открытый ключ ЭП вместе с его реквизитами (информацией о владельце, сроке действия и др.), подписанный первым секретным ключом УДЦ. Кроме того, формируется, а впоследствии обновляется список отозванных сертификатов, подписываемый по второму секретному ключу УДЦ. Затем сертификаты открытых ключей ЭП, а также список отозванных сертификатов помещаются на МНИ администратора безопасности переносятся на серверы распределения сертификатов в контур юридически значимой ЭП и внутренний контур ЭП для распределения среди пользователей по ЛВС.

Формирование и проверка ЭП выполняются пользователями или агентами интеграции СрЗИ на АРМ электронной подписи (ЭП) в контуре юридически значимой ЭП и АРМ должностных лиц с клиентом электронной подписи (КЭП) во внутреннем контуре ЭП. Причем ЭП электронного документа, сообщения, связанных с ними элементов данных и атрибутов безопасности формируются с помощью ПКЗИ ЭП или клиента электронной подписи (КЭП) по секретному ключу ЭП пользователя или агента интеграции СрЗИ, считываемому с персонального учетного грифованного МНИ или хранящегося на защищенном встроенном носителе. Проверка ЭП также выполняется с помощью ПКЗИ ЭП или КЭП и предполагает запрос и получение по ЛВС на сервере распределения сертификатов (СРС) сертификата открытого ключа ЭП пользователя или агента интеграции, сформировавшего ЭП, а также проверку на СРС полученного сертификата открытого ключа ЭП по списку отозванных сертификатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрен практический подход к безопасной интеграции разнотипных АС и СрЗИ для унифицированного и централизованного контроля доступа пользователей к совместным ресурсам формируемой ЕГС на базе сервис-ориентированной архитектуры. Исходя из изложенного материала можно сформулировать следующие выводы.

1. Подход к безопасной интеграции разнотипных АС на основе разделения (изолирования друг от друга) контуров обработки и хранения информации по грифам секретности (НС, ДСП, С, СС) характеризуется более высокой возможностью сертификации по требованиям регуляторов (ФСТЭК, МО РФ, ФСБ), но ведет к избыточности СВТ, проблемам в автоматическом информационном взаимодействии с сопрягаемыми системами, а также не позволяет в полной степени достигнуть унифицированного контроля доступа к совместным ресурсам ЕГС.

2. Способ с использованием сервис-ориентированной архитектуры для построения интегрированной СЗИ ЕГС обеспечивает возможность автоматического информационного взаимодействия между сопрягаемыми АС на основе унифицированного контроля доступа к совместным ресурсам ЕГС, но связан с необходимостью разработки и проблемной сертификации сервисной шины (ESB) со встроенным диспетчером доступа, адаптеров безопасности межсистемного взаимодействия, а также агентов интеграции СрЗИ.

3. Максимальная результативность безопасной интеграции разнотипных АС и СрЗИ для унифицированного и централизованного контроля доступа пользователей к совместным ресурсам ЕГС может быть достигнута при совместной реализации подходов с разделением (изолированием друг от друга) контуров обработки и хранения информации по грифам секретности и применением сервис-ориентированной архитектуры, когда в качестве диспетчера доступа для разделенных контуров обработки и хранения информации по грифам секретности используется сервисная шина, выполняющая роль посредника в безопасном информационном обмене для взаимодействующих сегментов ЛВС и АС, подключаемых к шине по коммуникационной инфраструктуре через адаптеры безопасности межсистемного взаимодействия.

4. При безопасной интеграции разнотипных АС необходима валидация передаваемых сообщений и документов, предполагающая формирование и проверку их электронной подписи (ЭП) с помощью соответствующих средств на основе инфраструктуры управления ключами ЭП и цифровыми сертификатами.

5. Целесообразно использовать два реализуемых контура ЭП: 1) контура юридически значимой ЭП для обмена подписанными документами с внешними структурами (организациями и ведомствами), сертифицируемого по требованиям ФСБ; 2) внутреннего контура ЭП для формирования и проверки электронной подписи служебных документов и информационных сообщений в ЕГС, сертифицируемого по требованиям МО РФ.

Список используемых источников

1. Зима В.М., Крюков Р.О. Технология совместного использования квалифицированной и неквалифицированной электронной подписи в системах автоматизированного документооборота специальных ведомств // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 664. – С. 208–216.

2. Зима В.М., Новиков С.В., Андрушкевич Д.В. Подход к построению защищенных распределенных сетей обработки данных на основе доверенной инфраструктуры // Труды СПИИРАН. – СПб.: Наука, 2015. – Вып. 13(38), т. 1.

3. Зима В.М. Технология взаимодействия специального программного обеспечения со средствами защиты информации в специализированных гетерогенных АС // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 664. – С. 144–155.

4. Об электронной подписи: федеральный закон [от 06.04.2011 г. № 63-ФЗ]. – URL: <http://www.consultant.ru> > document (дата обращения: 23.04.2021).

Р.И. Компаниец;
А.Г. Ломако,
доктор технических наук, профессор;
А.В. Харжевская,
кандидат технических наук

МЕТОД КОНТРОЛЯ ЦЕЛОСТНОСТИ ВЫЧИСЛЕНИЙ РАСЧЕТНЫХ ЗАДАЧ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ВЕРИФИКАЦИИ ИНВАРИАНТОВ ПОДОБИЯ

Предложено решение научной задачи верификации корректности алгоритмов программ при искажениях вычислений расчетных задач (РЗ) для разрешения проблемной ситуации. Эта ситуация заключается в необходимости обеспечения устойчивости функционирования программ РЗ автоматизированных систем военного назначения (АС ВН) в условиях программно-математических воздействий (ПМВ) с одной стороны и в несовершенстве методов контроля целостности и верификации алгоритмов программ в условиях искажений и модификаций вычислений – с другой. Существенно, что разработанный подход к решению научной задачи позволяет повысить результативность обнаружения признаков искажений и модификаций вычислительного процесса РЗ и повысить устойчивость функционирования РЗ АС ВН.

Ключевые слова: устойчивость вычислений, контроль целостности, признаки искажений и модификаций, инварианты подобия, вычислительный процесс.

ВВЕДЕНИЕ

Специфика военно-политической обстановки, сложившейся к настоящему времени на международной арене, появление новых средств и способов ведения вооруженной борьбы в информационной сфере требуют повышенного внимания к проблеме поддержания необходимого уровня обеспечения информационной безопасности (ИБ) информационно-вычислительных систем (ИС) критического применения.

Информационно-вычислительные системы (ИВС) имеют ограниченный срок для выполнения в реальном режиме времени важных или критических с точки зрения ресурсных затрат задач. Их невыполнение может иметь катастрофические последствия, поэтому большую долю ИВС относят к системам критического применения или критически важным объектам.

На государственном уровне к ИС критического применения относится критическая информационная инфраструктура (КИИ), ключевые системы информационной инфраструктуры и автоматизированные системы (АС) управления критически важными объектами, в том числе военного назначения.

Однако следует констатировать, что на данный момент ИВС критического применения содержат достаточно высокий процент импортной элементной базы, программного обеспечения (в том числе сред его разработок) и аппаратного обеспечения зарубежного производства. Использование недоверенных сред разработки и функционирования программного обеспечения, угрозы незакрытых уязвимостей, несовершенство существующих методов сертификации не дают полной уверенности в соответствии программ их функциональной спецификации, тем самым представляя угрозу целостности производимых вычислений. Кроме того, большой опасностью для вычислительных систем являются угрозы, связанные с функционированием невыявленных программных закладок, ошибок и уязвимостей в сертифицированных программных средствах. Такие угрозы могут привести к искажениям вычислений. Незначительная модификация процессорных вычислений при выполнении программ расчетных задач может привести к ошибке или к ее накоплению при производстве промежуточных

вычислений. Следовательно, вероятность таких модификаций при выполнении РЗ повышает риск погрешности, неточности и ошибочности вычислений при возможной реализации уязвимостей, связанных с модификацией арифметических операций.

Проблемам обеспечения устойчивости функционирования ИВС посвящены зарубежные и отечественные научные исследования. Ученые Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского внесли существенный вклад в становление и развитие понятий алгоритмической (Р.М. Юсупов), информационной (Ю.Г. Ростовцев, Б.А. Резников), технической (В.А. Смагин), программной (А.Г. Ломако, Ю.И. Рыжиков, В.В. Ковалев, Р.И. Компаниец) надежности вычислений и их устойчивости (С.А. Петренко, В.А. Новиков, А.А. Платонов). Однако вопросам обнаружения искажений вычислительного процесса (ВП), вызванных как сбоями и отказами оборудования, так и целенаправленными модификациями вычислений посредством реализации программно-математических воздействий (ПМВ), в работах указанных выше ученых должного внимания не уделялось.

СОДЕРЖАТЕЛЬНАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Дан вычислительный процесс РЗ, функционирующий в АС ВН, на который скрыто воздействует «модификатор» вычислений, заключающийся в искажениях операторов арифметического типа. Необходимо найти систему контроля устойчивого функционирования ВП, которая в пределах выделенных ресурсов максимизирует функцию вероятности обнаружения воздействий на процесс вычислений и примет решение по его восстановлению с ограничениями по множеству обнаруживаемых воздействий и времени на восстановление вычислений (рис. 1).

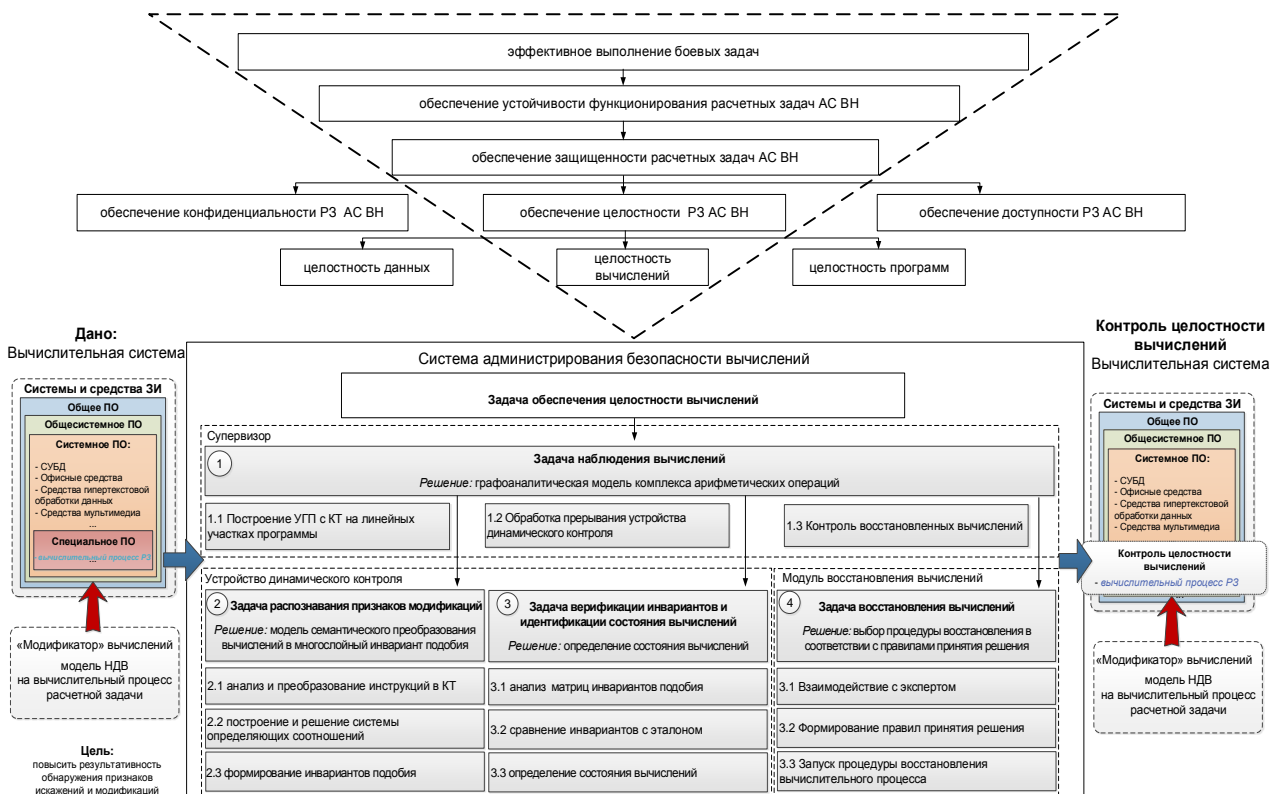


Рис. 1. Облик системы семантического контроля целостности программ выполнения РЗ

Для решения общей задачи обеспечения целостности вычислений необходимо решить следующие частные задачи: наблюдение вычислений; распознавание признаков модификаций; верификацию инвариантов и идентификацию состояния вычислений; восстановление вычислений. Последовательное решение данных задач обеспечивает контроль целостности вычислительного процесса в условиях возможных модификаций [1].

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Дано: вычислительный процесс расчетной задачи автоматизированной системы военного назначения в условиях программно-математических воздействий:

$$\Theta = \langle T, X, Y, Z, O, F, \Phi \rangle, \quad (1)$$

где T – множество моментов времени наблюдения t вычислительного процесса,

$$T = \{t\} \subseteq R;$$

X, Y – множества входных и выходных данных вычислительного процесса;

Z – множество состояний вычислительного процесса;

O – множество воздействий на вычисления;

F – множество операторов переходов f_i , отражающих механизм изменения состояний ВП при его выполнении, в том числе при выполняемых арифметических операциях;

Φ – множество операторов выходов ϕ_i , описывающих механизм формирования результата вычислений.

Состояние z_{kj} ($j = \overline{1, m}$) ВП в каждый момент времени характеризуется последовательностью выполнения арифметических операций. Эволюция состояния состоит в следующем:

$$z_T = z(\cdot): T \rightarrow Z.$$

Найти: систему контроля устойчивого функционирования вычислительного процесса

$$\Sigma = \{E, R, \Pi, T^*, \Psi, P, C, A\}, \quad (2)$$

где E – классы состояний ВП, при этом $E = \{e_{\langle n \rangle i}\}_{i=0}^m$, где $e_{\langle n \rangle i} = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in})^T$ – j -е техническое состояние вычислений;

R – множество признаков r_{ij} всех технических состояний ВП,
 $R = \{r_{ij} \mid i = 1, mE; j = 1, n\};$

Π – множество проверок целостности вычислений, $\Pi = \{\pi_j\}_{j=1}^n$;

T^* – опорные моменты времени контроля целостности ВП, $T^* = \{t_i^*\}_{i = \overline{1, m}}$;

Ψ – оператор, устанавливающий связь между множествами состояний, проверок и моментов их выполнения с одной стороны и множеством ожидаемых исходов проверок – с другой, $\Psi: E \times \Pi \times T^* \rightarrow R \times T^*$.

Такая система контроля максимизирует функцию вероятности обнаружения воздействий на ВП:

$$\Sigma = \int_{t_0}^{t_k} P_{\text{обн}}(t) dt \xrightarrow{\Sigma \in \Omega} \max, \quad (3)$$

$$T_{\text{выч}} \rightarrow \min,$$

где Ω – множество систем контроля.

Ограничения:

$$\sum_{i=0}^m P(e_i) = 1, \quad (4)$$

где P – множество вероятностных мер перехода вычислений из одного технического состояния в другое, которое определяется формулой $P = \{P(e_i) | i = \overline{1, m}\}$. При этом

$$C_{об} = \sum_{j=1}^n c(\pi_j) \leq C_p, \quad (5)$$

где $C_{об}$ – стоимость обнаружения воздействий и восстановления ВП;

C – множество цен проверок (суммарная стоимость временных затрат и материальных ресурсов), $C = \{c(\pi_j) | j = \overline{1, n}\}$

C_p – допустимые затраты на обнаружение воздействий и восстановление вычислений.

Кроме того, вероятность искажения аддитивных операций (сложения и вычитания)

$$A = \{e_{<n>i} \in E_{кор} / H_1\} \rightarrow \min,$$

где H_1 – ошибка второго рода.

Требования:

$$\tau = \begin{cases} t_0 \leq T_{выч} \leq t_k \\ T_{обн} = t_{инв} + t_{ср} \end{cases}, \quad (6)$$

где $T_{выч} [t_0; t_k]$ – допустимое время вычислений;

$T_{обн}$ – время обнаружения модификации;

$t_{инв}$ – время построения инварианта;

$t_{ср}$ – время сравнения инвариантов.

АНАЛИЗ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРОГРАММ РАСЧЕТНЫХ ЗАДАЧ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Современные АС ВН представляют собой сложную распределенную вычислительную систему и являются совокупностью общего, системного и специального программного обеспечения (СПО). Особого внимания требует организация контроля целостности вычислений расчетных и информационно-расчетных задач АС ВН, так как своевременно невыявленная модификация одного оператора может привести к накоплению ошибок и получению неверных результатов расчетов. Вместе с этим растет и значимость последствий несанкционированной модификации ПО, поскольку с ростом сложности построения АС ВН и разрабатываемого СПО увеличивается вероятность программно-математических воздействий [2], что уменьшает устойчивость функционирования программ расчетных задач.

Показатель устойчивости функционирования АС ВН является одним из основных, наряду с живучестью и надежностью, и влияет на итоговую эффективность решения боевых задач. Устойчивость функционирования расчетных задач достигается через защищенность их выполнения, которая обеспечивается конфиденциальностью, доступностью и целостностью расчетной задачи (РЗ). Целостность РЗ обеспечивается целостностью данных, алгоритмов и вычислений (см. рис. 1).

В силу высокой сложности архитектуры построения АС и потенциальной опасности внедрения недекларированных возможностей в оборудование и общесистемное ПО, а также в силу невозможности на этапе сертификации выявить всевозможные уязвимости, АС становятся

крайне уязвимыми к скрытым воздействиям на процесс вычислений программно-аппаратных закладок и вредоносного ПО. Схема нанесения ущерба ВП осуществляется посредством использования уязвимостей ПО и угрозы воздействия недоверенных сред его разработки и функционирования (рис. 2, а, б).

Анализ моделей и методов контроля и верификации алгоритмов программ показал следующее. Основными недостатками методов контроля целостности является их неприменимость для динамически изменяющегося ВП и, как следствие, отсутствие семантического контроля процесса вычислений. Также существуют потенциально возможные коллизии контрольных сумм для контроля целостности исходных файлов программ.

В результате анализа методов верификации стало понятно, что верификация семантики программ присутствует в статических методах, однако в динамике исполнения процесса вычислений теория верификации программ данную проблему не решала.

Обеспечение целостности вычислений имеет особенность, заключающуюся в том, что, в отличие от данных вычисления, при выполнении меняют свою структуру и состав, и внешнее окружение. Указанная особенность создает трудности процесса контроля целостности вычислений, которые необходимо разрешить для поддержания требуемого уровня защиты вычислительного процесса.

Для разрешения данной проблемы проведенные исследования позволили выдвинуть идею контроля вычислений, используя семантические инварианты подобия. Теорема подобия выявляет зависимость между эталонным и штатным процессами и позволяет построить инварианты, которые не зависят от значений программных переменных и строятся на основе положений теорий размерностей и функционального подобия.

```
#include "stdafx.h"
#include "MathFuncsDll.h"
namespace MathFuncs
{
    double MyMathFuncs::Add(double a, double b)
    {
        return a + b;
    }
    double MyMathFuncs::Subtract(double a, double b)
    {
        return a - b;
    }
    double MyMathFuncs::Multiply(double a, double b)
    {
        return a / b;
    }
    double MyMathFuncs::Divide(double a, double b)
    {
        return a * b;
    }
}

#include "stdafx.h"
#include "MathFuncsDll.h"
int main()
{
    int a, b;
    cin >> a >> b;

    cout << a << " + " << b << " = " << MathFuncs::MyMathFuncs::Add(a,b) << endl;
    cout << a << " - " << b << " = " << MathFuncs::MyMathFuncs::Subtract(a,b) << endl;
    cout << a << " * " << b << " = " << MathFuncs::MyMathFuncs::Multiply(a,b) << endl;
    cout << a << " / " << b << " = " << MathFuncs::MyMathFuncs::Divide(a,b) << endl;
    getch ();
    return 0;
}
```

6 2 = 8
6 - 2 = 4
6 * 2 = 3
6 / 2 = 12

Рис. 2. Подмена модифицированной DLL-библиотеки (а) и модификации кода, размещенного в сегменте данных (б) (начало)

```

#include <vcl.h>
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#pragma hdrstop
typedef void (*FPTR)();
typedef unsigned int uint;
int diff(int a, int b)
{
    return a - b;
}
void stub()
{
}
#pragma data_seg(".Modif")
__asm {
met:
    push ebp
    mov ebp, esp
    mov eax, [ebp + 8]
    add eax, [ebp + 12]
    pop ebp
    ret
}
#pragma data_seg()
int main(int argc, char* argv[])
{
    int s1,s2, res, sz;
    char* src,*dst;
    FPTR p1,p2;
    p1 = (FPTR)diff;
    p2 = (FPTR)stub;}
asm { push eax
    mov eax, offset met
    mov dst,eax}
src = (char*)p1;
sz = (uint)p2 - (uint)p1;
printf("enter the s1,s2\n");
scanf("%d,%d",&s1,&s2);
asm { push s1
    push s2
    call met
    add esp, 8
    mov res,eax }
printf("%d + %d = %d\n", s1,s2,res);
getch();
for(int i = 0; i < sz; i++)
{
    dst[i] = src[i];
}
asm {
    push s2
    push s1
    call met
    add esp, 8
    mov res,eax
}
printf("%d + %d = %d\n", s1,s2,res);
getch();
return 0;
}

```

Рис. 2. Подмена модифицированной DLL-библиотеки (а) и модификации кода, размещенного в сегменте данных (б) (окончание)

МОДЕЛЬ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРОГРАММ РАСЧЕТНЫХ ЗАДАЧ С КОНТРОЛЕМ ЦЕЛОСТНОСТИ ВЫЧИСЛЕНИЙ НА ОСНОВЕ ВЕРИФИКАЦИИ ИСКАЖЕНИЙ В МНОГОСЛОЙНЫХ ИНВАРИАНТАХ ПОДОБИЯ

Общая модель обеспечения устойчивого функционирования программ РЗ включает в себя модели защищаемого объекта (М1) – вычислительный процесс, функционирующий в АС ВН; воздействующей системы (М2) – «модификатор» вычислений и управляющей системы (М3) – система интеллектуального администрирования безопасности вычислений (рис. 3).

Представление вычислительного процесса (М1) управляющим графом программы (УГП) вызвано необходимостью решения задачи наблюдения за вычислительным процессом. Такое представление внутренней структуры программы позволяет выделить потенциально опасные линейные участки (ЛУЧ), внедрить в них контрольные точки (КТ) и в каждой КТ построить семантический инвариант для контроля целостности вычислений [4].

Модель воздействия на вычислительный процесс расчетной задачи (М2), которое заключается в искажениях операторов арифметического типа, позволяет описать вычисления в условиях искажений и модификаций операций следующим образом. СПО приводится к нормализованной форме иерархии программных комплексов, программ, подпрограмм (модулей), содержащих функции и операторы, которые проецируются на адресное пространство фон Неймана, построенное в базисе – адрес элемента памяти и условное время. Нарушение семантической корректности программы происходит на ЛУЧах программы (согласно графовой модели представления ВП).

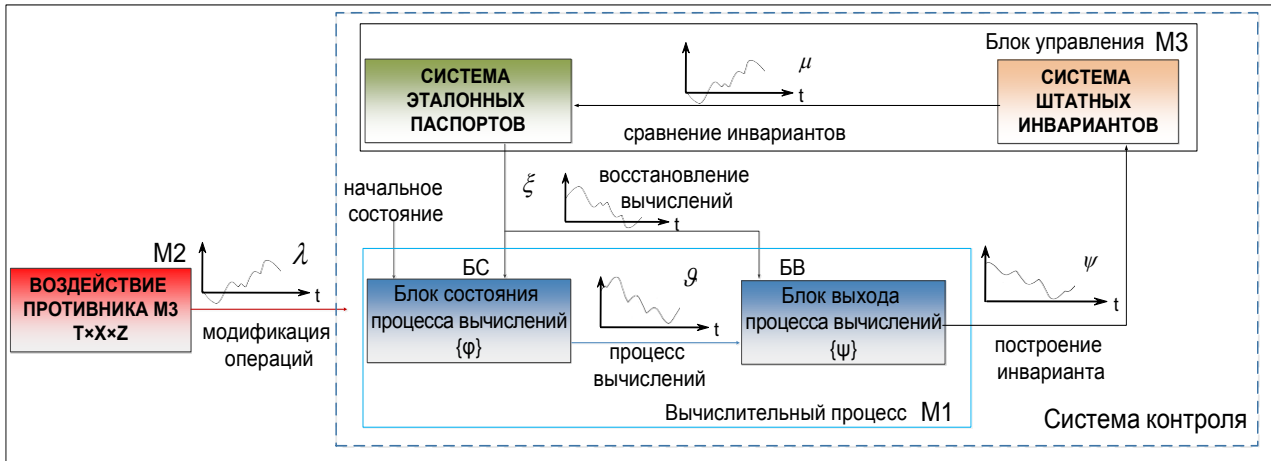


Рис. 3. Общая модель обеспечения устойчивого функционирования программ P3

Модель семантического преобразования вычислений (M3) необходима для синтеза новых информативных признаков – инвариантов подобия. Для формирования инвариантов подобия структуру процесса вычислений можно представить, используя аппарат КС-грамматик:

$$G = (\Sigma, N, R, S).$$

В выражении введены следующие обозначения:

$\Sigma = \{identifier, const, address...register\}$ – набор терминальных символов;

$N = \{Add, Sub, Mul, \dots, Div\}$ – набор нетерминальных символов;

$R = \{AddCom, SubCom, MulCom, \dots, DivCom\}$ – множество правил вывода;

$S \in \Sigma$ – стартовый символ.

Терминальные символы включают в себя лексемы команд арифметического сопроцессора (команды сложения, вычитания, умножения, деления, присваивания и передачи данных). Набор нетерминальных символов представляет собой множества лексем, объединенных по обобщающему признаку, а также их комбинации с использованием продукций. Правило вывода, представленное выражением (7), обуславливает применение команды «fadd». Таким образом, представляются все возможные правила вывода в языке ассемблер:

$$\begin{aligned} AddCommand &\rightarrow Addition_Register, Address \\ &| Addition_Register, Register \\ &| Addition_Register, Register \Rightarrow faddp\ st(1), st \\ &| \dots \end{aligned} \quad (7)$$

где *Addition* – нетерминальное множество команд сложения сопроцессора;

Register – терминальное множество регистров стека сопроцессора;

Address – множество идентификаторов памяти или непосредственно адресов памяти.

Целостность выполнения арифметического оператора оценивается с помощью семантической функции $T: a \rightarrow [a]$, которая каждому аргументу a ставит в соответствие некоторую абстрактную сущность или размерность $[a]$. Таким образом, арифметические команды ассемблера, выполняемые над программными переменными, фактически являются операциями над физическими размерностями, а отражения семантики, которые осуществляются во время выполнения, – линейными отображениями.

Для выполнения семантического преобразования разработана аксиоматика семантической алгебры (табл. 1), которая определяет правила выполнения операций над элементами семантического пространства и позволяет составить и решить систему линейных однородных

уравнений (СЛОУ) для получения информативных признаков вычислительного процесса – инвариантов подобия. Совокупность эталонных инвариантов в КТ трассы выполнения программы образует паспорт программы.

Таблица 1

Аксиоматика семантического отображения

Операция	Представление	Уравнения в терминах размерности	Результаты суперпозиции	Коэффициенты подобия
Присваивание	$L = P$	$[L] = [P]$ совпадение семантической размерности	$[R]^0[L]^1[P]^{-1} = 1$	0 1 -1
Сравнение (больше)	$L > P$			
Сравнение (меньше)	$L < P$			
Сложение	$R = L + P$			
Вычитание	$R = L - P$			
Умножение	$R = L * P$	$[R] = [L][P]$	$[R]^1[L]^{-1}[P]^{-1} = 1$	1 -1 -1
Деление	$R = L / P$	$[R] = [L][P]^{-1}$	$[R]^1[L]^{-1}[P]^1 = 1$	1 -1 1
Возведение в степень	$R = L^s$	$[R] = [L]^s$	$[R]^1[L]^{-s}[P]^0 = 1$	1 -s 0

Представление знаний о вычислениях в виде многослойного инварианта позволяет формально описать модель программы, которая включает в себя знания о ее структуре (структурный инвариант) и семантике (семантический инвариант) вычислений и решить задачу распознавания признаков модификаций. Многоуровневое представление вычислительного процесса изображено в виде древовидной структуры, корнем которой является СПО, а листьями – атомарные вычислительные операции.

Для формирования семантического инварианта, полученного при решении СЛОУ, в качестве переменных уравнений используются операнды программ. Для формирования структурного инварианта в качестве переменных систем уравнений используются имена подпрограмм, комплексов и задач. Считается, что если два элемента структуры не взаимодействуют между собой, то они связаны между собой аддитивной операцией «+». В противном случае они связаны мультипликативной операцией «*». Таким образом, мы имеем возможность описать полученную структуру в виде СЛОУ (рис. 4).

Идея представления знаний о вычислениях в виде многослойного инварианта составляет научную новизну разработанной модели. Впервые предложенная семантическая модель ПО в виде многослойных инвариантов подобия, для которой построена аксиоматика семантической алгебры, определяющая правила выполнения операций над элементами семантического пространства, позволяет решить задачу распознавания признаков модификаций ВП и определить место программы, которое подверглось искажению.

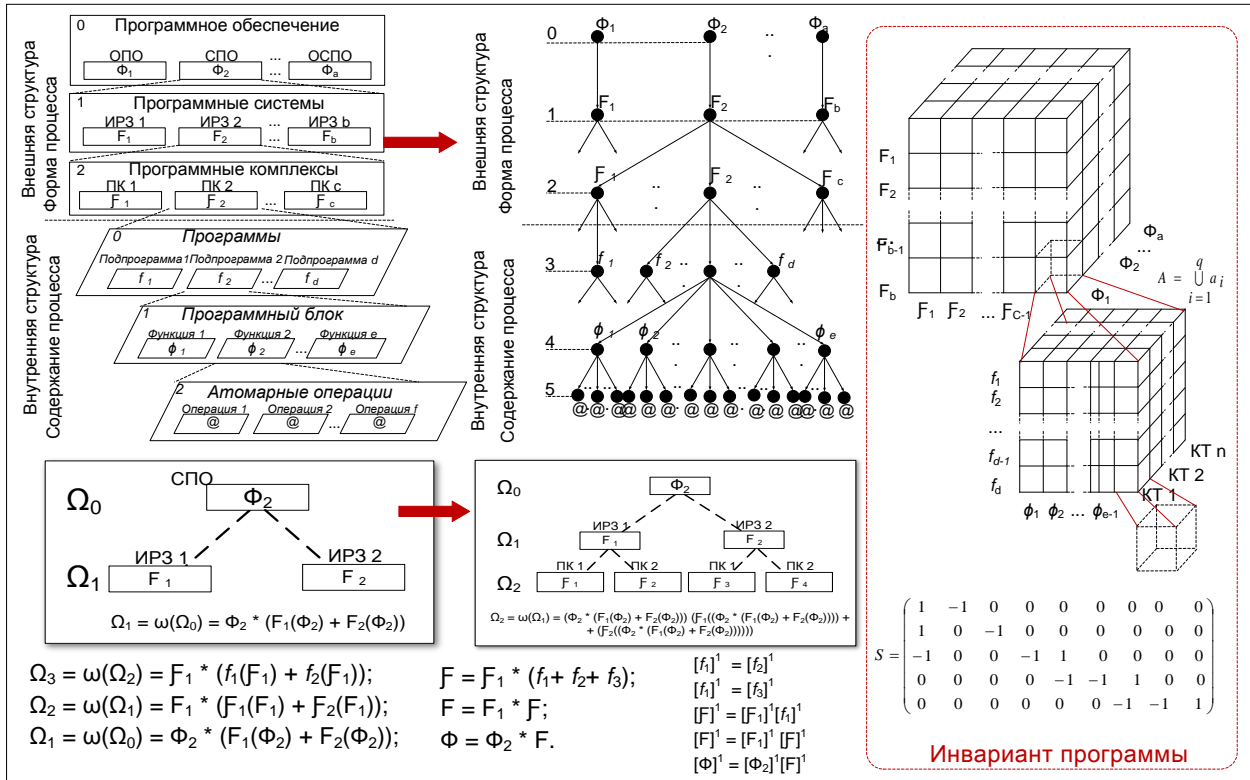


Рис. 4. Синтез многослойных инвариантов подобия

МЕТОД ВЕРИФИКАЦИИ КОРРЕКТНОСТИ АЛГОРИТМОВ ПРОГРАММ РАСЧЕТНЫХ ЗАДАЧ ПРИ ИСКАЖЕНИЯХ И МОДИФИКАЦИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТРИЧНОЙ СИСТЕМЫ ЭТАЛОНОВ В РАЗМЕРНОСТЯХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Схема этапов верификации корректности процессов вычислений включает подготовительный этап, этап контроля и восстановления. К подготовительному этапу относится этап формирования паспорта программы в эталонных инвариантах подобия, к этапу контроля – формирование инвариантов подобия в условиях воздействий в КТ УГП, проверки критерия семантической корректности вычислительных процессов и формирования сигнала о нарушении семантики вычислений. К этапу восстановления относится этап выбора процедур восстановления вычислений в соответствии с решающим правилом. Алгоритм ВП приводится к графовой форме представления с целью выведения операторов арифметических выражений из управляющих операторов (условных переходов, ветвлений, циклов). Как результат – УГП приводится к виду, в котором все операторы арифметических выражений сгруппированы на множестве ЛУЧ программы – вершинах графа, в которые необходимо установить КТ. Представление контрольной точки имеет следующий формат:

$$\langle \text{КТ} \rangle ::= \langle \text{тип операции} \rangle; \tag{8}$$

$$\langle \text{тип операции} \rangle ::= \langle \text{имя_подпрограммы} \rangle \langle \text{параметры} \rangle.$$

Реализацию B^k управляющего графа программы в КТ можно представить в виде упорядоченной последовательности первичных соотношений, соответствующих арифметическим операторам [1]. Выполнив в правых частях соотношений суперпозицию, получим систему соотношений, инвариантных относительно перемещения:

$$y_i(x_1, x_2, \dots, x_N) = \sum_{j=1}^{t_i} \varphi_{ij}(x_1, x_2, \dots, x_N). \quad (9)$$

В соответствии с правилом Фурье слагаемые суммы (9) должны быть однородными по размерностям [1], т. е.

$$[y_i] = [\varphi_{ij}(x_1, x_2, \dots, x_N)], \quad j = \overline{1, t_i} \quad (10)$$

$$\text{или } [\varphi_{ij}(x_1, x_2, \dots, x_N)] = [\varphi_{il}(x_1, x_2, \dots, x_N)], \quad j, l = \overline{1, t_i}.$$

Система (10) является системой определяющих соотношений.

С помощью функции $\rho: X \rightarrow [X]$ каждому $x_i \in X$ сопоставлена размерность $[x_j] \in [X]$. С учетом этого выражение (9) примет вид

$$[\varphi_{ij}(x_1, x_2, \dots, x_N)] = \prod_{n=1}^N [x_n]^{\lambda_{jn}}, \quad j = \overline{1, t_i} \quad (11)$$

Используя формулы (10) и (11), строится система определяющих соотношений и преобразуется к виду

$$\prod_{n=1}^N [x_n]^{\lambda_{jn} - \lambda_{ln}} = 1, \quad j, l = \overline{1, t_i}. \quad (12)$$

Применив прием логарифмирования, из системы (12) получается однородная СЛОУ:

$$\sum_{n=1}^N a_{pn} \omega_n = 0, \quad p = \overline{1, r}, \quad (13)$$

где $a_{jk} = \lambda_{jk} - \lambda_{lk}$; $\omega_k = \ln[x_k]$, а r – число линейно независимых уравнений.

Выполнив подобное построение для $\forall B_i^k \in B^k$ и исключив линейно зависимые уравнения, для k -й реализации формируется система однородных линейных уравнений:

$$A^k \omega = 0. \quad (14)$$

Для корректно выполняющегося вычислительного процесса семантика эталонного результата совпадает с семантикой фактического результата. Поэтому необходимым условием семантической корректности [3] будет следующее:

$$\sum_{n=1}^N (\lambda_{jn} - \lambda_{ln}) \ln[x_n] = 0, \quad j, l = \overline{1, p_i}, \quad (15)$$

где N – количество переменных;

j, l – уравнения эталонной и штатной системы вычислений;

λ – коэффициент размерности переменной.

Достаточное условие корректности достигается выполнением всех функций и полным отсутствием модификаций арифметических операций. Проверка последнего условия позволяет с точностью до выражения определить нарушения семантики и место модификации операций.

В результате предложена архитектура системы управления безопасностью выполнения программ РЗ с контролем целостности вычислений. Принципиальная новизна замысла состоит в построении системы интеллектуального администрирования безопасности выполнения РЗ, в которой функции по интеллектуальному администрированию безопасности выполняет специализированный супервизор с программно-аппаратной обработкой прерываний при обнаружении инцидентов нарушений семантической корректности арифметических вычислений, взаимодействующий с устройством динамического контроля (рис. 5).

Устройство динамического контроля реализует функцию построения инвариантов, функцию обнаружения скрытых воздействий при рассогласовании штатных инвариантов подобия с эталонами паспорта программы и оповещения. Эти функции осуществляются путем передачи сигнала супервизору [5]. Супервизор производит оценивание рисков нарушений семан-

тической корректности арифметических вычислений на основе вводимых экспертных данных и запускает процедуры по восстановлению вычислений.

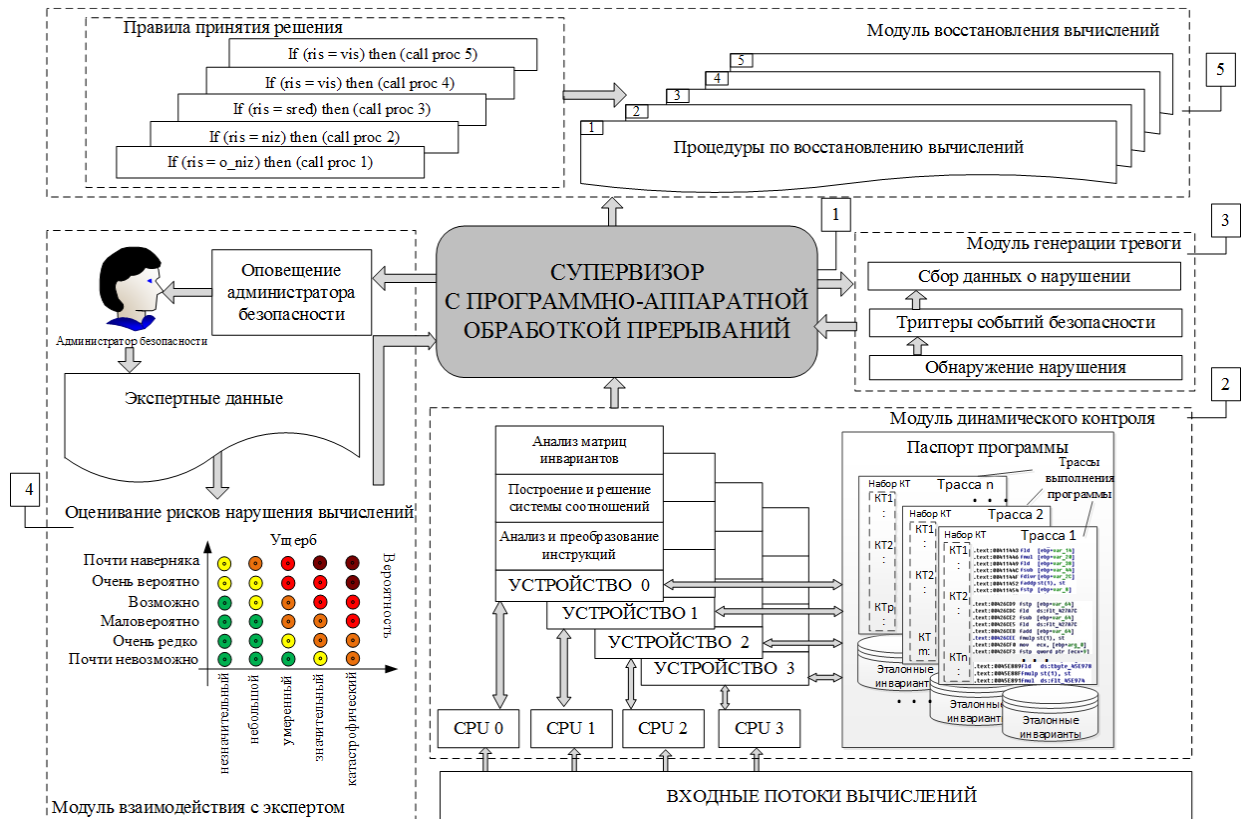


Рис. 5. Архитектура системы управления безопасностью вычислений

Принятие решения на запуск процедуры восстановления вычислений происходит в соответствии с правилами вида:

- ПРАВИЛО <1>: ЕСЛИ {Риск ОЧЕНЬ НИЗКИЙ}, ТО {ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ};
 ПРАВИЛО <2>: ЕСЛИ {Риск НИЗКИЙ}, ТО {МАСКИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА};
 ПРАВИЛО <3>: ЕСЛИ {Риск СРЕДНИЙ}, ТО {ОТКАТ К КТ};
 ПРАВИЛО <4>: ЕСЛИ {Риск ВЫСОКИЙ}, ТО {ДУБЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА};
 ПРАВИЛО <5>: ЕСЛИ {Риск ОЧЕНЬ ВЫСОКИЙ}, ТО {ОСТАНОВ ПРОЦЕССА}.

Предложенный метод отличается от известных тем, что для обнаружения признаков искажений и модификаций вычислительного процесса расчетных задач анализируются абстрактные размерности обрабатываемых переменных на основе синтеза математических аппаратов теорий размерности и подобия, позволяющих использовать матричную систему эталонных и штатных инвариантов с целью проверки критерия семантической корректности в контрольных точках выполнения программы.

Применение метода делает возможным максимально приблизить систему контроля искажений и восстановления процессов вычислений к семантике контролируемого процесса. Полученные результаты позволяют представить вычислительный процесс в виде соответствующей системы уравнений размерностей и инвариантов подобия вычислений, а ее решение – исследовать семантику вычислений в условиях скрытых модификаций.

Таким образом, в результате последовательной реализации этапов метода, основанного на применении инвариантов подобия как новых информативных признаков для контроля целостности вычислительного процесса, можно решить задачу верификации инвариантов подобия и идентификации состояния вычислений.

РЕЗУЛЬТАТЫ КОНТРОЛЯ ЦЕЛОСТНОСТИ ВЫЧИСЛЕНИЙ ПРОГРАММ РАСЧЕТНЫХ ЗАДАЧ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ С ВОССТАНОВЛЕНИЕМ ПРИ МОДИФИКАЦИЯХ КОДОВ АРИФМЕТИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ

Контроль целостности вычислений включает в себя формирование паспорта программы, обнаружение инцидентов нарушения целостности вычислений и их восстановление (рис. 6).

При формировании паспорта программы вычислительный процесс приводится к графовой форме представления с целью выведения операторов арифметических выражений из управляющих операторов (условных переходов, ветвлений, циклов). Как результат – управляющий граф процесса приводится к виду, в котором все операторы арифметических выражений сгруппированы на множестве линейных участков программы – вершинах графа, в которые внедряются контрольные точки (КТ).

Далее формируются протоколы выполнения программы в виде последовательности прохождения КТ. В каждой КТ строится дерево разбора арифметического выражения, формируются уравнения подобия, решением которых является эталонная матрица. База данных эталонных матриц для арифметических выражений в КТ программы для каждого пути ее реализации представляет собой паспорт программы. Проверка критерия семантической корректности в КТ программы позволяет обнаружить нарушение семантики вычислений.

В случае обнаружения семантического несоответствия система администрирования безопасности оповещает оператора об инциденте и обрабатывает введенные экспертные оценки для анализа риска нарушения целостности вычислений на основе автоматизированного метода анализа иерархий (МАИ).

МАИ позволяет синтезировать приоритеты, вычисляемые на основе вводимых экспертом данных [6]. Модуль взаимодействия с экспертом производит математические вычисления и обработку поступающей экспертной информации, выполняет количественную оценку альтернативных вариантов решения и на основе полученных данных, в соответствии с разработанными правилами, генерирует предлагаемые действия. После того как администратор безопасности одобрит рекомендуемые действия, супервизор запускает процедуру восстановления вычислений.

Таким образом, решается задача восстановления искаженных вычислений. Последовательная и согласованная реализация разработанных моделей и метода верификации корректности алгоритмов программ в совокупности отражает основные этапы контроля целостности вычислений расчетных задач автоматизированных систем военного назначения в условиях искажений и модификаций на основе верификации инвариантов подобия.

Анализ достижения эффективности контроля целостности вычислений через номенклатуру показателей качества системы контроля выполнения расчетной задачи показал следующее. Целостность вычислений обеспечивается качеством системы контроля выполнения расчетных задач, которая, в свою очередь, обеспечивается следующими показателями: результативностью, ресурсоемкостью и оперативностью. Результативность характеризуется полнотой обнаружения модификаций вычислительного процесса, ресурсоемкость оценивается процессорным временем, затрачиваемым на обнаружение, а оперативность контроля – временем обнаружения модификаций и временем восстановления вычислений [7].

Полнота семантического контроля вычислений оценивалась по разработанной графовой модели нарушения программных объектов в арифметических конструкциях на основании предварительного анализа статистических характеристик программного кода. Показано, что общая полнота обнаружения искажений операторов арифметического типа на основе верификации

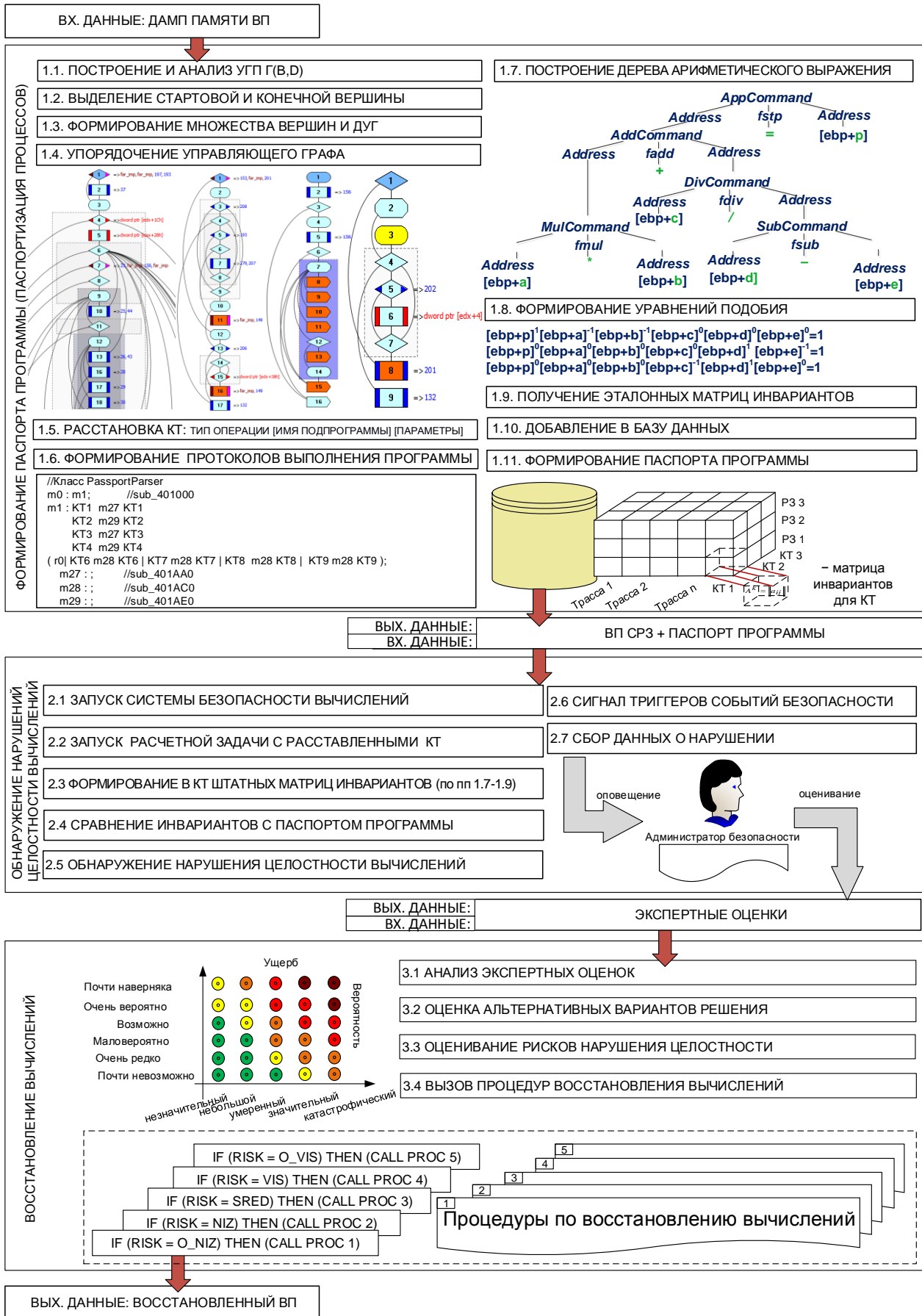


Рис.6. Этапы контроля целостности вычислений

инвариантов подобия достигает порядка 90%. Исключение составляет обнаружение модификаций, связанных с заменой «+» на «-», с потерей или добавлением слагаемого.

На основании представления процессов обнаружения воздействий и восстановления вычислений в виде ориентированных графов состояния [8] получена модель восстановленных вычислений в виде передаточных функций. Показано, что среднее время выполнения вычислений при высокой вероятности достоверного обнаружения искажений определяется средним временем их обнаружения (рис. 7,а). При уменьшении вероятности правильного обнаружения среднее время вычислений резко возрастает (рис. 7,б).

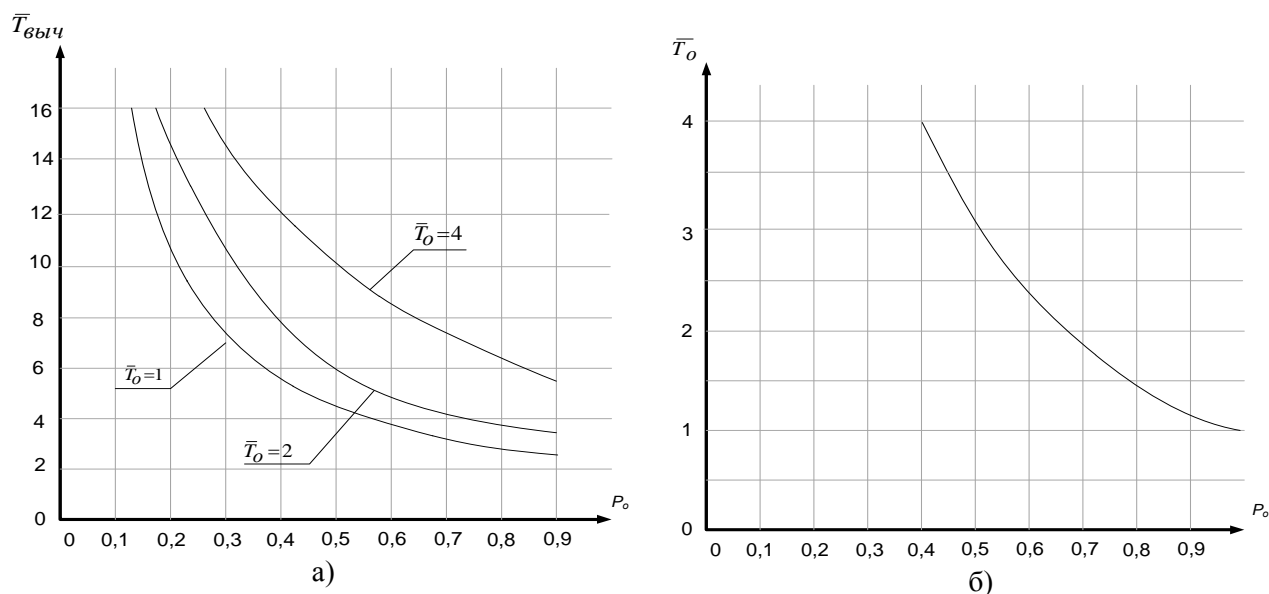


Рис. 7. Графики зависимости:

а – времени вычислений – от вероятности достоверного обнаружения искажений;
б – среднего времени обнаружения искажений – от вероятности их обнаружения

Анализ результатов эксперимента, проведенного при реализации контроля целостности вычислений, представлен в виде таблицы (табл. 2).

Таблица 2

Анализ результатов эксперимента

Характеристика	Методы экспериментального анализа	Существующие СЗИ	Предлагаемый метод
Полнота обнаружения модификаций (чувствительность)	60–75%	85%	до 90%
Ресурсоемкость контроля целостности вычислений (для процессоров класса Intel Pentium, ОС Windows7)	–	до 15%	до 27%
Оперативность обнаружения искажений и восстановления вычислений	до 24 ч.	до 2 ч	до 20 мин
Уровень ложных срабатываний	–	Низкий	Низкий
Вероятность пропуска модификаций вычислений	Высокая (свыше 40%)	Средняя (до 20%)	Низкая (до 10%)

Разработанный научно-методический аппарат, как дополнение к существующим методам контроля, позволил повысить полноту обнаружения модификаций арифметических операций на 10–15% и оперативность восстановления вычислительных процессов за счет дополнительных ресурсных затрат до 27%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получены следующие результаты, характеризующиеся научной новизной:

– разработан многомодельный подход к решению задачи верификации корректности программ, который отличается от известных существующих подходов тем, что позволяет формально описать модель программы, включающую в себя знания о ее структуре (структурный инвариант) и о семантике (семантический инвариант) вычислений. Впервые предложенная семантическая модель ПО в виде многослойных инвариантов подобия позволяет решить задачу распознавания признаков модификаций ВП и определить место программы, которое подверглось модификации;

– разработан метод верификации корректности алгоритмов программ РЗ, основанный на использовании инвариантов подобия как новых информативных признаков для контроля целостности вычислительного процесса, позволяющий решить задачу верификации инвариантов и идентификации состояния вычислений.

– представлена концепция обеспечения устойчивости функционирования программ РЗ АС ВН с контролем целостности вычислений. Принципиальная новизна замысла состоит в построении системы интеллектуального администрирования безопасности выполнения РЗ. В ней функции по интеллектуальному администрированию безопасности выполняет специализированный супервизор с программно-аппаратной обработкой прерываний при обнаружении инцидентов нарушений семантической корректности арифметических вычислений. Инциденты нарушений семантики заключаются в рассогласовании штатных инвариантов подобия с эталонами паспорта программы в ее контрольных точках (КТ). Супервизор позволяет оценивать риски нарушений безопасности вычислений по введенным экспертным данным и принимать меры для немедленного восстановления вычислений.

При оценке метода контроля целостности вычислений на основе верификации инвариантов подобия были выявлены следующие преимущества:

- высокая вероятность обнаружения искажений большинства арифметических операций;
- наличие классов программно-математических воздействий (искажений и модификаций арифметических операций), не обнаруживаемых существующими СЗИ;
- высокий уровень показателя качества обнаружения искажений и модификаций арифметических операций по сравнению с существующими методами.

Полученные результаты позволяют повысить результативность и оперативность обнаружения признаков модификаций вычислений, а также обеспечить устойчивость функционирования специального программного обеспечения на требуемом высоком уровне. Применение метода целесообразно в качестве дополнения к существующим СЗИ, что позволит получить в целом систему с низким уровнем ложных срабатываний, способную при этом обнаруживать искажения семантики вычислений.

Список используемых источников

1. Ковалев В.В., Компаниец Р.И., Новиков В.А. Верификация программ на основе соотношений подобия // Труды СПИИРАН. – 2015. – № 1. – С. 233–245.
2. Козачок А.В., Кочетков Е.В. Обоснование возможности применения верификации программ для обнаружения вредоносного кода // Вопросы кибербезопасности. – 2016. – № 3 (16). – С. 25–32.

3. *Годердзишвили Г.М., Ковалев В.В., Романюк В.А.* Метод статического контроля правильности программ. – СПб., 1986. – 8 с.
4. *Зотова А.В., Компаниец Р.И., Ковалев В.В.* Способ паспортизации расчетных алгоритмов программ // Защита информации. Инсайд. – 2016. – № 5 (71). – С. 26–33.
5. Пат. на полезную модель 179302 РФ. Устройство динамического контроля выполнения специальных вычислений / Харжевская А.В., Ломако А.Г., Петренко С.А.; заявитель и патентообладатель ВКА им. А.Ф. Можайского. – № 2017140535; заявл. 21.11.17; опубл. 07.05.2018.; Бюл. 13.
6. *Саати Т.* Принятие решений. Метод анализа иерархий. – М.: Радио и связь, 1993. – 278 с.
7. Новиков В.А. «Спецпроверка» программ / В.А. Новиков, Р.И. Компаниец, А.Г. Ломако // Защита информации. Инсайд. – 2006. – № 3 (9). – С. 18–27.
8. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1974. – 832 с.

А.С. Подшибякин;
И.А. Ушаков,
кандидат технических наук;
А.Ф. Шинкаренко,
кандидат технических наук

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МЕХАНИЗМОВ ЗАЩИТЫ В БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЯХ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

В работе представлены результаты, полученные с использованием разработанного программного комплекса автоматизированного сбора аутентифицированных данных о беспроводных сетях передачи данных (БСПД), инкапсулированных в алгоритмах сертификации устройств на базе протоколов группы стандартов IEEE 802.11.

Ключевые слова: Wi-Fi, беспроводные сети, получение доступа, программный комплекс, беспроводные сети передачи данных, WPS, WPA/WPA2, информационная безопасность.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время получение доступа на элементы информационной инфраструктуры БСПД является одним из наиболее перспективных векторов удаленного доступа во внутреннюю сетевую инфраструктуру объектов, использующих беспроводные подключения к информационным ресурсам. Согласно статистическим данным компании Positive Technologies [1], в семи из восьми протестированных в 2020 году информационных систем элементы БСПД были доступны за пределами контролируемой зоны. В зависимости от используемого метода аутентификации потенциальный нарушитель осуществляет проверку возможности реализации различных типов доступа. Для технологии WPA2 с типом шифрования PSK выполняется сбор аутентифицированных данных между беспроводной точкой доступа и соответствующим легитимным клиентом с последующим подбором паролей методом перебора. Успех получения доступа данного типа обусловлен сложностью пароля. Таким образом, именно сложности пароля необходимо уделить особое внимание при проектировании и реализации технологий защиты информационно-телекоммуникационной инфраструктуры.

Для проведения автоматизированного анализа функционирования механизмов защиты БСПД в ходе исследований разработан программный комплекс (ПК) мониторинга БСПД, который обеспечивает решение следующих задач:

- сбора сетевой информации о БСПД, использующих технологию WPA2, на основе эвристических методов анализа процесса идентификации клиентских устройств;
- автоматизированного восстановления структуры взаимосвязей между устройствами БСПД, использующих технологию WPA2;
- хранения данных и метаданных, полученных в результате проведения структурно-синтаксического анализа беспроводных протоколов и механизмов идентификации сетевых устройств.

Область применения ПК – это обнаружение беспроводных точек доступа (сетей), анализ передаваемого сетевого трафика по беспроводным сетям, аудит всевозможных протоколов шифрования, включающий в себя последующую реализацию сценариев тестирования БСПД при необходимости.

В статье приводятся результаты анализа функционирования механизмов защиты в БСПД по результатам исследования особенностей получения доступа на основе технологии Wi-Fi Protected Setup [2] и Wi-Fi Protected Access 2 [3] БСПД с использованием разработанного ПК.

СПЕЦИФИКА ПОЛУЧЕНИЯ ДОСТУПА К БСПД, ИСПОЛЬЗУЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИЮ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ WPS

Получение доступа к беспроводному маршрутизатору возможно посредством технологии Wi-Fi Protected Setup (защищенная установка) и стандарта WPS (одноименный протокол) полуавтоматического создания БСПД. Целью разработки протокола WPS является упрощение процесса настройки БСПД, также протокол призван обеспечить унифицированное подключение к ресурсам БСПД. Для защиты от несанкционированного доступа стандарта WPS автоматически определяет наименование сети и задает тип шифрования. Как правило, клиенту не нужно задавать все параметры вручную [4].

Получение доступа, используя WPS, возможно благодаря обнаружению нарушителями отдельных недостатков технологий Wi-Fi Protected Setup. Стремление разработчиков ПО и беспроводного оборудования облегчить настройку этих аппаратов обернулось дефектом. В частности, абсолютная защита ключом позволяет нарушителю, при наличии достаточных знаний и соответствующих программ, осуществить несанкционированный доступ за приемлемое время, составляющее порядка нескольких часов.

Протокол защиты WPS подразумевает, что беспроводной маршрутизатор автоматически формирует и передает клиенту код защиты, известный лишь взаимодействующим между собой абонентам. Сформировать такой PIN можно тремя способами:

- 1) путем нажатия кнопки на устройстве и аналогичной по назначению кнопки в программном интерфейсе приложения;
- 2) путем ввода PIN-кода в web-интерфейсе маршрутизатора, доступ к которому открывается через браузер, запущенный на компьютере, подключенном к данному маршрутизатору;
- 3) при использовании специальной программы для ввода ключа, запускаемой на компьютере (интерфейс программы содержит единственное поле для ввода PIN).

Отметим, что последний способ – наименее защищенный. При наличии необходимого программного обеспечения нарушитель имеет возможность организовать на устройство «атаку полным перебором» и подобрать PIN методом перебора.

Учитывая, что длина кода составляет восемь цифр, количество возможных комбинаций этих цифр составит порядка ста миллионов вариантов. Однако ключевыми в коде являются лишь первые семь цифр, а все вместе они должны удовлетворять значению контрольной суммы, что снижает число комбинаций на порядок.

Чтобы осуществить доступ к устройству БСПД, нарушитель должен определиться со структурой протокола аутентификации WPS. Проверка PIN-кода реализуется в два этапа (рис. 1).

1. Если пользователь отправит сообщение M4, в ответ приходит EAP-NACK. Это свидетельствует о том, что значение первой части PIN-кода указано неверно.

2. Если пользователю приходит сообщение в виде EAP-NACK после отправки M6, это говорит о том, что нужно правильно ввести данные второй части PIN-кода. Существует 10^4 (10.000) вариантов, которые предназначаются для первой части и 10^3 (1000) – для второй. Пользователь может использовать 11000 вариантов для полного перебора.

Проведенные исследования показали, что время получения доступа к беспроводному маршрутизатору находится в интервале от 1 до 10 ч (рис. 2). Наибольшее количество удачных подборов пароля находилось в интервале 5–7 ч, что значительно меньше времени, затрачиваемого на подбор пароля WPA2. Однако функция WPS остается включенной на очень малом количестве устройств. Абсолютное большинство пользователей уже владеют информацией о наличии подобной уязвимости и предпочитают WPS отключать.

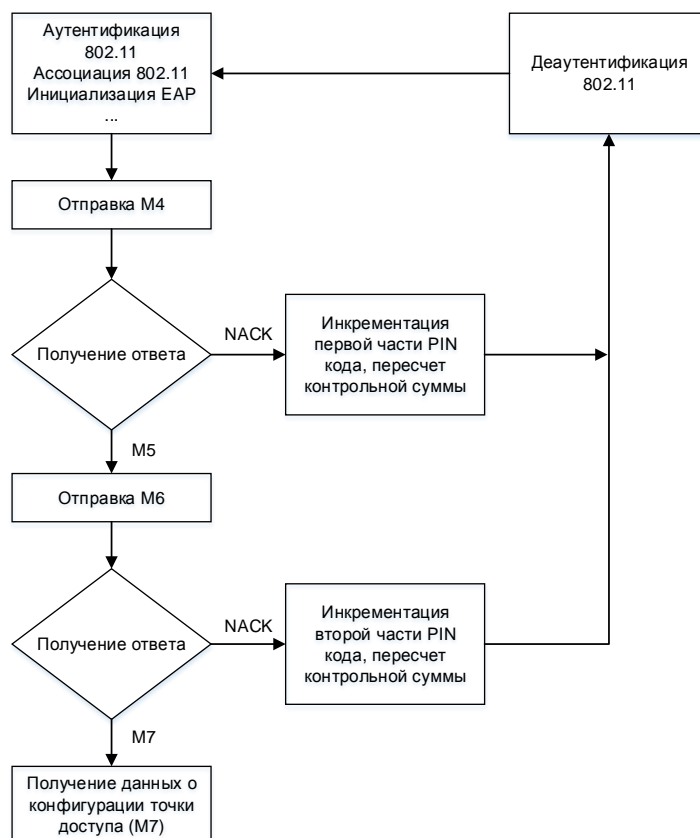


Рис. 1. Схема подбора PIN-кода WPS

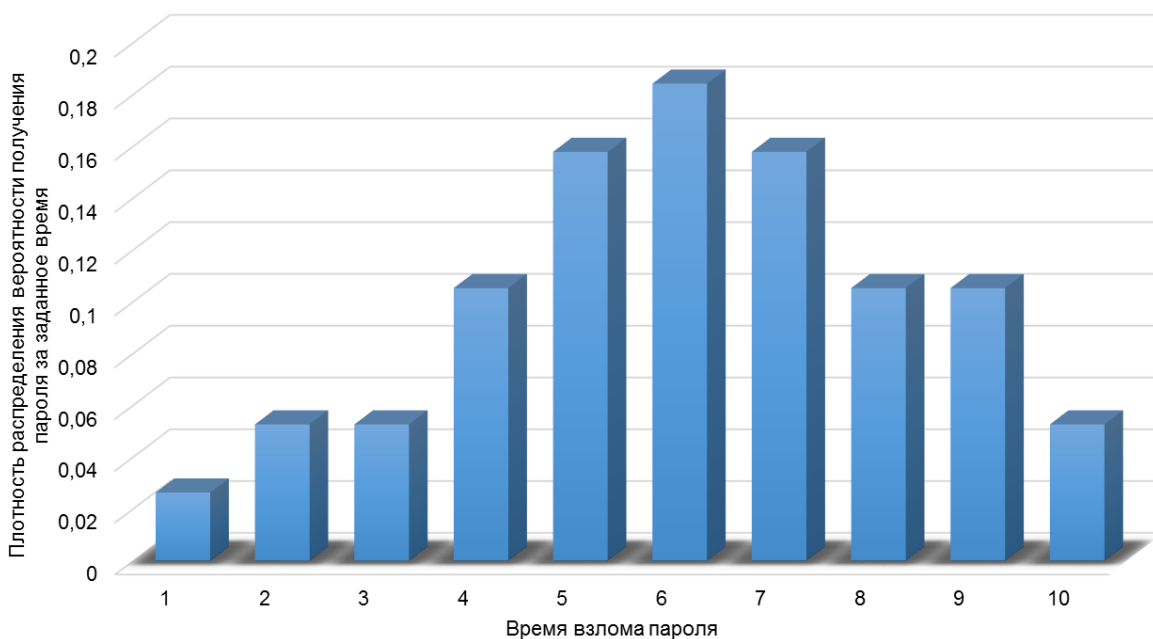


Рис. 2. Результаты получения пароля WPS

ПОЛУЧЕНИЕ ДОСТУПА К WI-FI СЕТИ, ИСПОЛЬЗУЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИЮ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ WPA/WPA2

Более требовательным к производительности и гораздо более затратным по времени является способ получения доступа к БСПД с перехватом «рукопожатия» (четырёхэтапный обмен зашифрованными ключами между подключаемым клиентом и точкой доступа в момент подключения) и последующим подбором пароля.

Анализ исходных данных, а также данных, полученных в ходе исследования, позволил выявить 20 наиболее часто используемых паролей от БСПД в имеющейся выборке. При анализе отмечено, что большинство паролей являются комбинацией («keywalk») цифр и букв на обычной QWERTY клавиатуре. При этом только из цифр состоит 85% всех паролей, а длина не более 10 знаков. На 8-значные пароли из цифр приходится примерно 50%, на 10- и 9-значные пароли состоящих из цифр – пришлось 20% и 15%, по 5% у 8- и 10-значных паролей, состоящих из букв в нижнем регистре, а 5% – это 8-значные пароли из цифр и букв в нижнем регистре.

Анализ статистики относительно длины пароля показал (рис. 3), что первое место занимают 8-значные пароли (53%), 10- и 9-значные находятся на втором и третьем месте (14% и 11% соответственно), 5% у 11-значных паролей и 9% – оставшиеся. Еще 8% – это номера телефонов. Это могут быть как 11- и 12-значные пароли, начинающиеся с 7, 8 или +7 (в случае РФ), так и пароли из 10 символов. Необходимо отметить, что 10-значных паролей больше чем 9-значных.

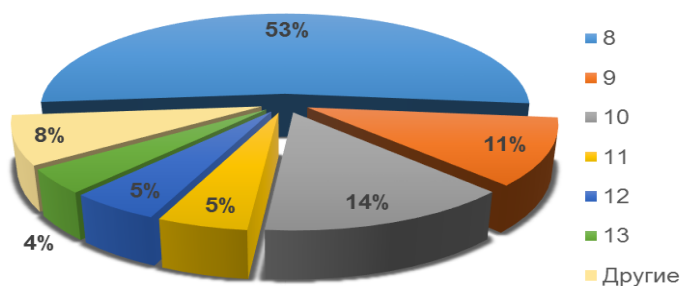


Рис. 3. Статистика по композиции паролей

Кроме того, был проведен анализ выборки по композиции паролей в ней (рис. 4). Следует отметить, что полностью из цифр состоят около $\frac{2}{3}$ всех паролей. На пароли из цифр и букв в нижнем регистре приходится около 16%. На пароли, имеющие в своем составе буквы разных регистров, а также цифры, приходится 3%. Таким же образом обстоят дела с паролями из со-

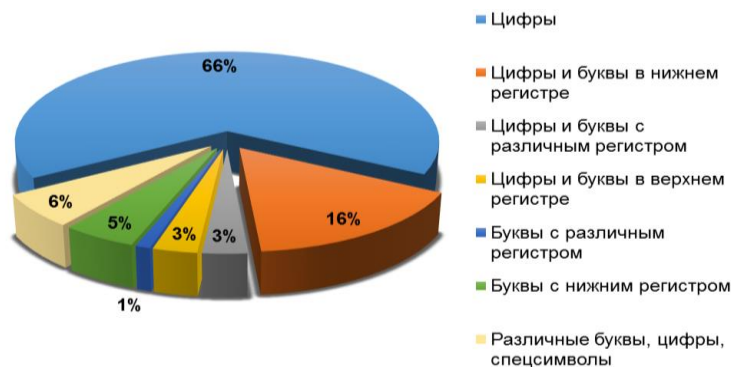


Рис. 4. Анализ композиции паролей

четания больших букв и цифр. Различные сочетания букв, цифр и спецсимволов присутствуют в 6% паролей, 1% – это комбинации букв в разных регистрах.

Анализ полученных данных (рис. 5) указывает на возможность применения масок при подборе паролей, а любые односоставные конструкции от 8 до 11 символов можно отнести к наиболее слабым маскам паролей, т. е. около 65% всей выборки (включая номера телефонов). Эта статистика говорит об отсутствии должного внимания к установке достаточно защищенного пароля для БСПД и, соответственно, о достаточно выгодных условиях для проведения успешной атаки нарушителем.

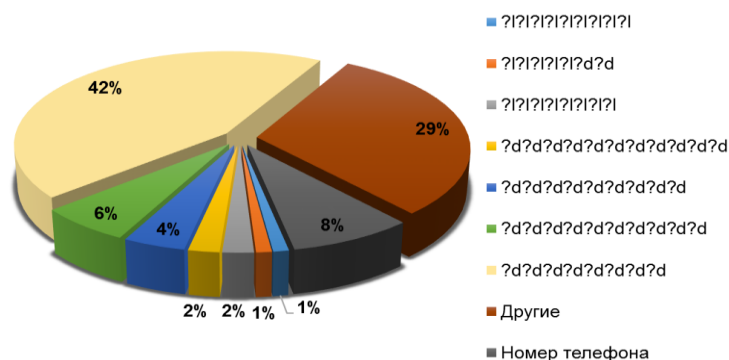


Рис. 5. Соотношение применения различных масок при осуществлении подбора пароля

Разработанный ПК позволяет как самому оператору задавать маску подбора пароля, так использовать одну из имеющихся в программном комплексе по умолчанию.

Ниже представлены ключи к описанию масок в разработанном ПК, а примеры приведены в табл. 1:

- ?l = abcdefghijklmnopqrstuvwxyz,
- ?u = ABCDEFGHIJKLMNOPQRSTUVWXYZ,
- ?d = 0123456789,
- ?s = !"#%&'()*+,-./:;<=>?@[^_`{|}~,
- ?a = ?l?u?d?s,
- ?b = 0x00 - 0xff.

Таблица 1

Примеры задания масок

Используемые символы	Пример пароля	Задание маски
Цифровые пароли	Восьмизначный цифровой пароль	?d?d?d?d?d?d?d?d?d?d
Буквенный пароль – все заглавные буквы	Пароль набран буквами верхнего реестра, вроде ABCFEFGH или LKNJHIOP или ZBTGYHQS и т. д.	?u?u?u?u?u?u?u?u?u?u
Буквенный пароль – все строчные буквы	Пароль набран строчными буквами, вроде abcdefgh или dfgbpoiu или bnmiopty и т. д.	?l?l?l?l?l?l?l?l?l?l
Пароль – буквы нижнего регистра и цифры	Пароль имеет вид наподобие a1b2c3d4 или p9o8i7u6 или n4j2k5l6 и т. д. (буквы и цифры чередуются)	?l?d?l?d?l?d?l?d?l?d
Пароль – заглавные буквы и цифры	Пароль имеет вид наподобие A1B2C3D4 или P9O8I7U6 или N4J2K5L6 и т. д. (буквы и цифры чередуются)	?u?d?u?d?u?d?u?d?u?d
Пароли – смесь из заглавных, строчных букв, цифр и специальных символов	Пароль исключительно случайный	?a?a?a?a?a?a?a?a?a

Чем меньше известно о пароле, тем дольше время его подбора. В ситуациях отсутствия каких-либо данных о пароле возможно использование словарей (библиотек). Использование получения доступа по словарю может значительно увеличить шанс успеха.

Разработанный ПК имеет четыре параметра командной строки для настройки пользовательских наборов символов:

```
--custom-charset1=CS,  
--custom-charset2=CS,  
--custom-charset3=CS,  
--custom-charset4=CS.
```

Здесь CS –пользовательский набор символов, он может задаваться перебором символов, встроенными наборами символов и т. д. Ниже приведены примеры, поясняющие специфику использования предустановленных пользовательских масок.

WPA/WPA2-PSK входят в состав подмножества стандарта IEEE 802.11 WPA/WPA2. Это усложняет распределение ключей и аутентификацию клиента путем присвоения каждому участвующему Pre-Shared Key. Пользователю необходимо предварительно настроить пароль, например, на своем персональном ЭВМ и ТД [4], из которого впоследствии и получится этот главный ключ. Когда клиент создает соединение с ТД, новый ключ сессии происходит от мастер-ключа для шифрования и аутентификации. Когда клиент создает соединение к ТД, новый ключ сессии генерируется на основе мастер-ключа, для того чтобы зашифровать и авторизовать последующий трафик. Использование единственного мастер-ключа, а не отдельных ключей для каждого клиента упрощает развертывание локальных WPA/WPA2 сетей ценой уязвимости протокола к получению доступа перебора фазы передачи ключа. Это позволяет нарушителю полностью раскрыть пароль, который защищает сеть.

Стандарт WPA2 предусматривает необходимость задания пароля от 8 до 32 символов. При этом стандарт предусматривает возможность использования букв латинского алфавита верхнего и нижнего регистра, цифр и специальных символов. Так как количество возможных комбинаций пароля вычисляется по формуле

$$N = M^n,$$

где N – количество комбинаций возможных паролей;

M – количество используемых символов в данном пароле;

n – длина пароля в символах.

Количество возможных паролей для различных длин и символов представлено на рис. 6. При этом необходимо отметить, что такая характеристика как длина пароля является неизвестной при попытке обхода средств аутентификации. Таким образом, количество вариантов паролей для различных длин пароля необходимо суммировать.

По умолчанию в разработанном ПК используется маска подбора паролей, сформированная на основе анализа полученных в ходе выполнения работы данных, а также в ходе исследования аналогичных программных средств с открытым исходным кодом. Данная маска позволяет сократить время подбора пароля без снижения вероятности успешного исхода (рис. 7).

При решении задачи аудита ИБ ТД в части анализа стойкости парольной фразы WPA/WPA2 с помощью метода перебора наиболее продуктивно использовать вычислительную мощность видеокарты. Видеокарты имеют процессор, который позволяет выполнять операции с плавающей запятой намного лучше, чем центральный процессор. В качестве программного обеспечения для данной задачи использовался разработанный ПК.

Этап с перехватом рукопожатия при моделировании получения доступа к БСПД на основе полного перебора пароля является самым простым, особенно в сетях со множеством активных клиентов. Главной задачей при этом является получение пакетов с МІС и прочими данными авторизации. Далее необходимо провести подбор ключа, и этот этап требует больших

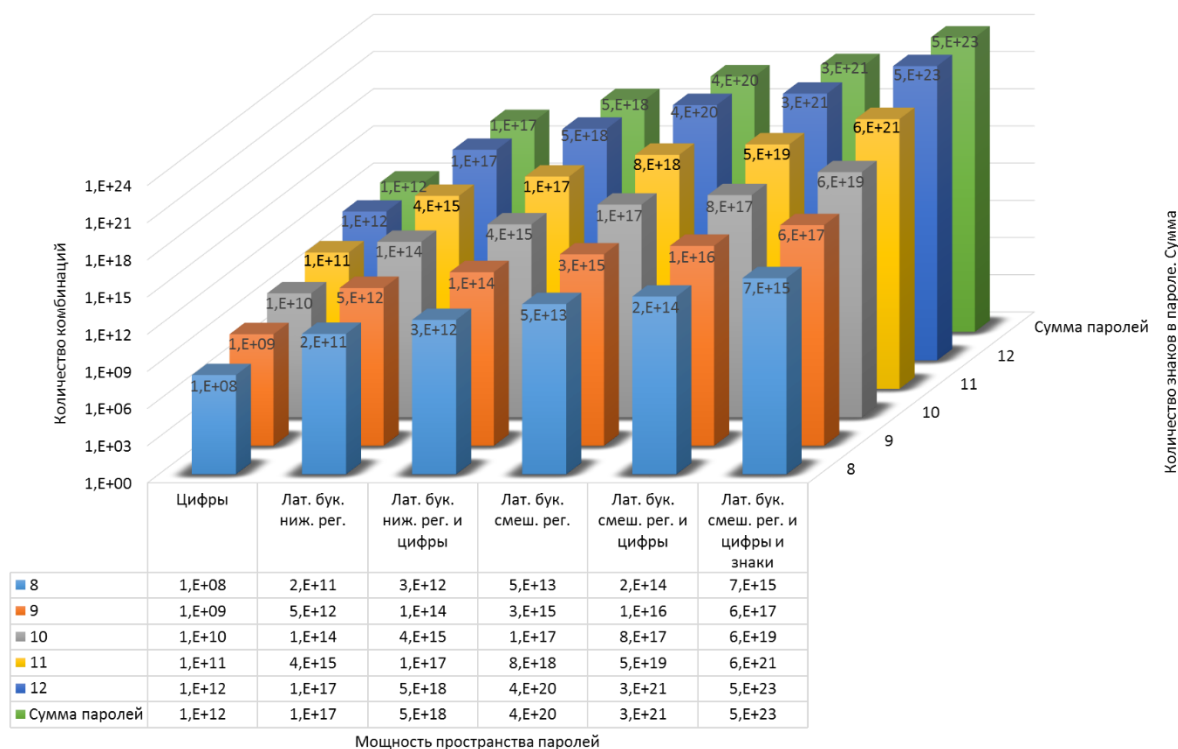


Рис. 6. Возможное количество комбинаций пароля для различных используемых символов и длины пароля

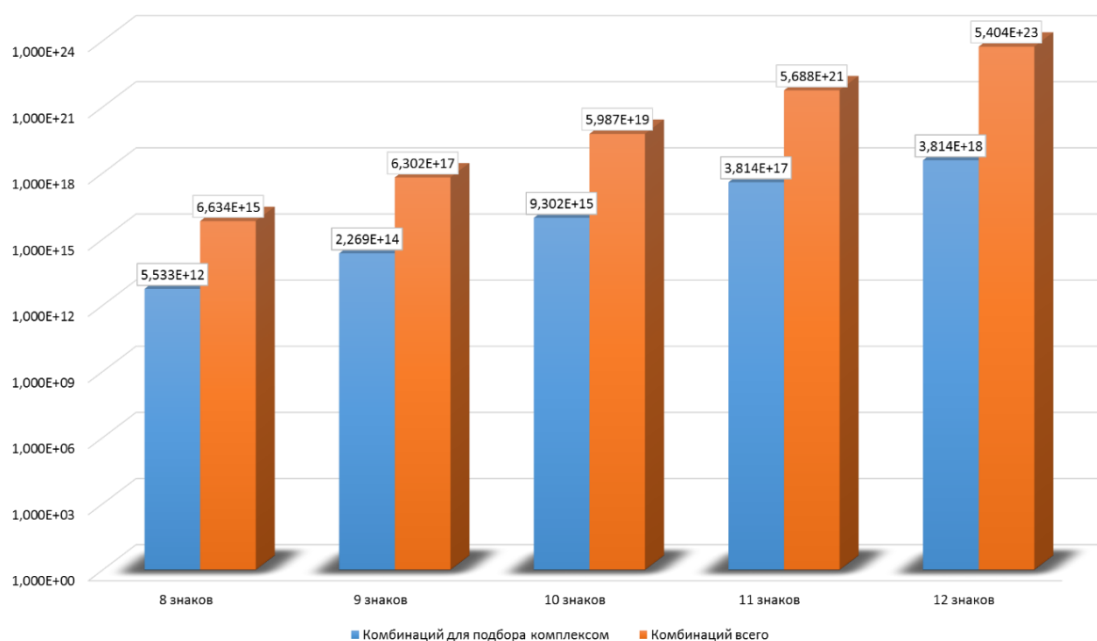


Рис. 7. Количество паролей с применением стандартной маски разработанного программного комплекса

вычислительных мощностей. Для таких целей возможно использование EC2-кластера или АТI-фермы.

Графические процессоры (ГП) по своим архитектурным особенностям сильно отличаются от архитектуры центрального процессора (ЦП). Если с ЦП идет речь о 4, 8, 16 ядрах (без учета серверов), то в случае ГП речь идет о тысячах независимых ядер. При обработке гра-

фической информации нужно оперативно выполнять операции над большими массивами данных, а именно матрицами. Именно такие операции и нужны в криптографии. Поэтому ГП лучше использовать для вычисления хэш-функций.

Причем ГП возможно объединять в рамках одной вычислительной системы, а системы – уже в вычислительные кластеры. При громадном приросте в производительности, в отличие от обычных ЦП, намного эффективнее собрать вычислительный кластер из 12 систем с 5 ГП, чем из 12 систем с 5 ЦП.

Проанализировав, как ЦП и ГП справляются с перебором паролей, необходимо сделать выводы. В табл. 2 представлена статистика по некоторым видеокартам. Цифры – ориентировочные (в зависимости от конфигурации системы, ОС, температуры/охлаждения и разгона).

Таблица 2

Скорость вычислений для различных видеокарт

Производитель	Модель	Скорость вычислений
nVidia	670	24,1 kh/s
nVidia	675MX	10,9 kh/s
nVidia	780M	42,2 kh/s
nVidia	580	47,3 kh/s
nVidia	Tesla K20	84,3 kh/s
nVidia	750 Ti	54,9 kh/s
nVidia	Titan Black	108,6 kh/s
AMD	280X	160,9 kh/s
AMD	290X	190,3 kh/s
AMD	295X*2	202*2 kh/s
AMD	5870	101,4 kh/s
AMD	5870	153,1 kh/s
AMD	6870	72,1 kh/s
AMD	6990	181,6 kh/s
AMD	7970	128,7 kh/s
AMD	7990	219,2 kh/s

В ходе исследований замеры выполнения перебора паролей для WPA2 разработанным ПК проводились для центральных процессоров Intel Xeon E5-2640 и Intel Xeon silver 4114, а также для графических процессоров Nvidia GeForce GTX 1050 и Nvidia Quadro M6000 (рис. 8). Теоретические данные в ходе практических экспериментов были подтверждены, и дальнейшие исследования проводились на графической платформе Nvidia Quadro M6000, показавшей максимальную производительность из имеющихся для подобных задач.

На рис. 9 представлены рассчитанные графики времени, необходимого для перебора возможных комбинаций различных длин пароля, в зависимости от используемого оборудования и скорости перебора. Из полученных результатов необходимо сделать вывод, что реализация подбора пароля на подобных системах является неприемлемым способом получения необхо-

димых данных для доступа к БСПД с организованным стандартом безопасности WPA2. Для решения подобных задач необходимо использование больших вычислительных кластеров с недоступными для персональных систем и обычных серверов мощностями.

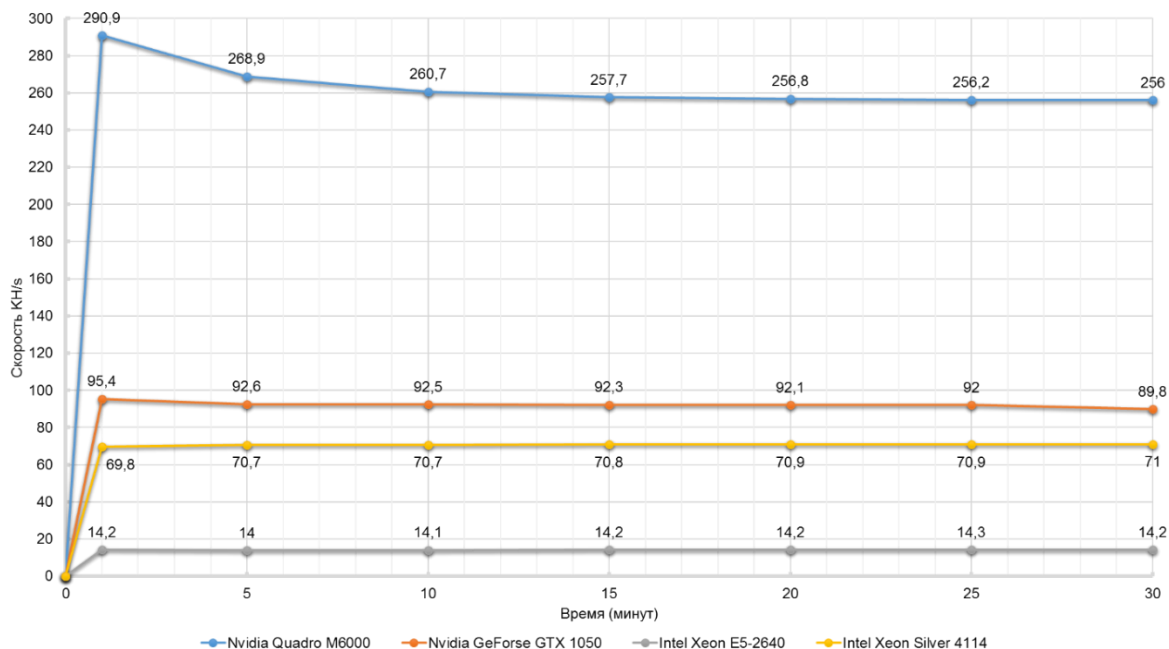


Рис. 8. Скорость (KH/s) расчета комбинаций в режиме перебора в разработанном программном комплексе

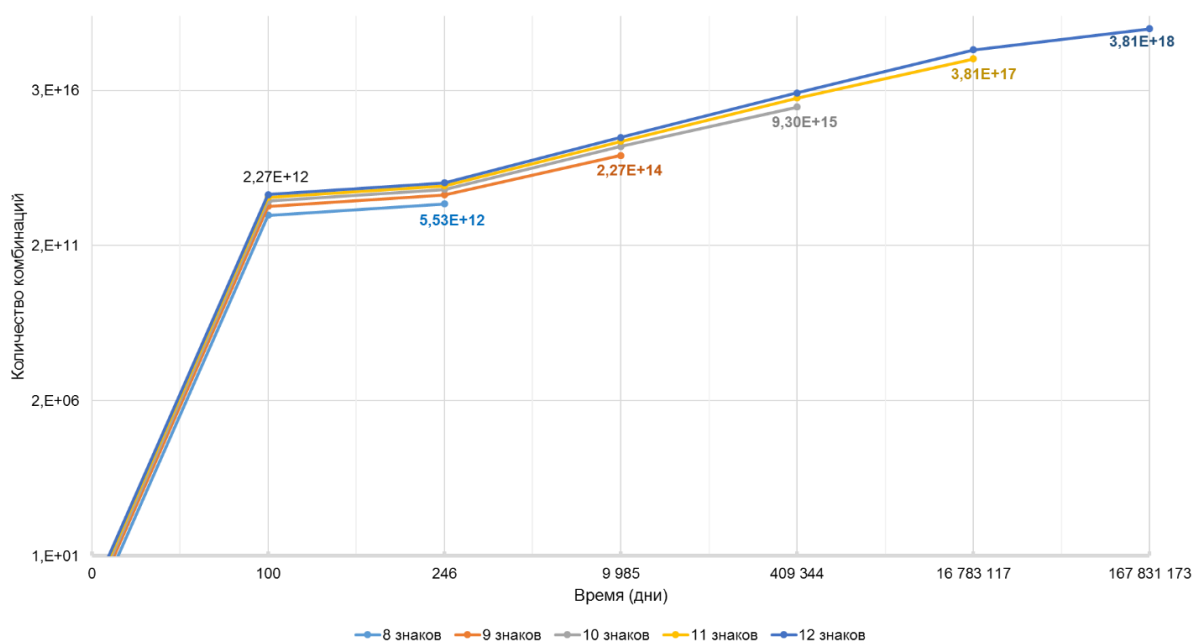


Рис. 9. Время, затраченное на перебор комбинаций паролей различной длины в режиме «bruteforce» с заданной маской по умолчанию в разработанном программном комплексе со скоростью ≈ 263 KH/s

Результаты выполненных расчетов и математического моделирования представлены в табл. 3.

Таблица 3

Длительность перебора возможных вариантов пароля

Длина пароля (символов)	Количество комбинаций перебора	Скорость перебора паролей			
		263 КН/s	92 КН/s	70 КН/s	14 КН/s
8	$5,53 \cdot 10^{12}$	246 дней	698 дней	915 дней	4565 дней
9	$2,26 \cdot 10^{14}$	26 лет	78 лет	103 лет	514 лет
10	$9,3 \cdot 10^{15}$	1121 лет	3206 лет	4214 лет	21068 лет
11	$3,81 \cdot 10^{17}$	45981 лет	131446 лет	172758 лет	863789 лет
12	$3,81 \cdot 10^{18}$	459811 лет	1314461 лет	1727577 лет	8637887 лет

Для выполнения операции подбора пароля возможно использование заранее составленных словарей с набором возможных паролей, что значительно ускоряет процесс вычислений. В настоящий момент в открытом доступе существует большое количество словарей с различными объемами. В ходе проведения исследований использовался словарь, содержащий более 100 миллионов паролей. Оперативность вычислений с использованием словаря представлена на рис. 10.

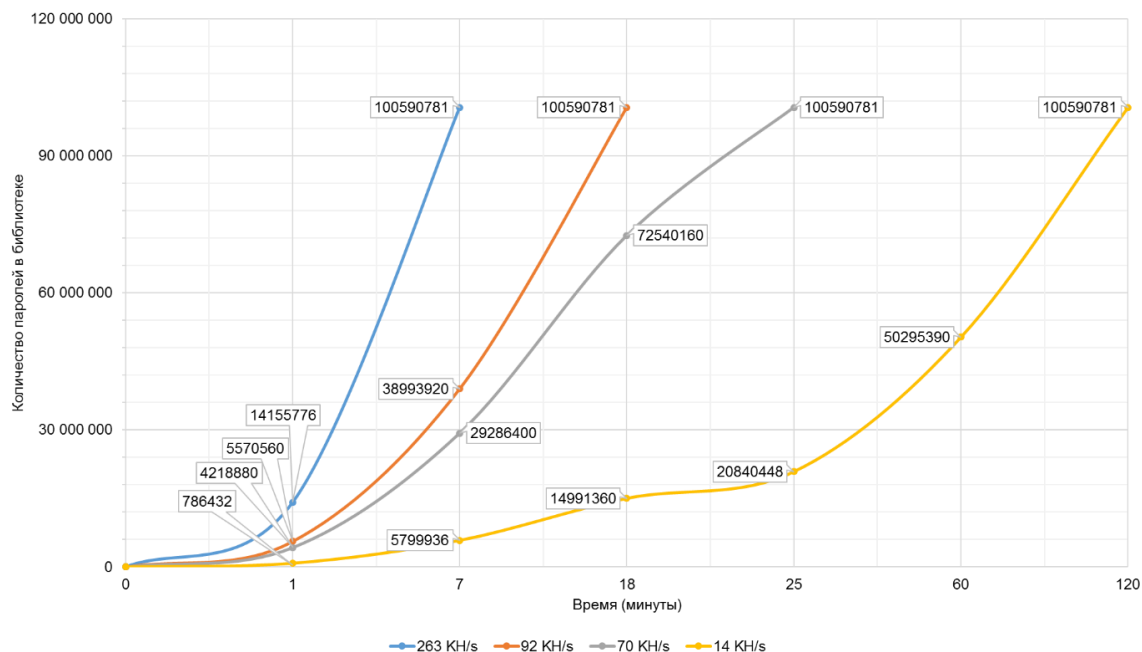


Рис. 10. Время, затраченное на полный перебор пароля в указанной библиотеке паролей в разработанном ПК на различных платформах

Использование словарей не дает стопроцентной гарантии подбора и, как правило, нацелено на перебор комбинаций, которые являются словами, фразами, а также наиболее часто используемых комбинаций, ранее выявленных в различных исследованиях.

Как видно из графиков, все комбинации имеющегося словаря на наиболее производительной системе были перебраны всего за 7 мин, а самая слабая с точки зрения производительности система смогла выполнить ту же задачу за 2 ч, что также мало по сравнению с процессом перебора всех возможных комбинаций без использования словаря.

В ходе проведенных экспериментальных подборов выявлена закономерность снижения производительности примерно на 10% от максимального значения, начиная со 2-й минуты проведения экспериментов. Снижение носит плавный характер, и производительность стабилизируется до итоговых значений на 10-й минуте работы. Это объясняется увеличением температуры процессора из-за критических показателей нагрузки и недостаточного уровня охлаждения (рис. 11). При достижении критической температуры происходит автоматическое снижение нагрузки для возвращения температуры процессора к допустимым значениям.

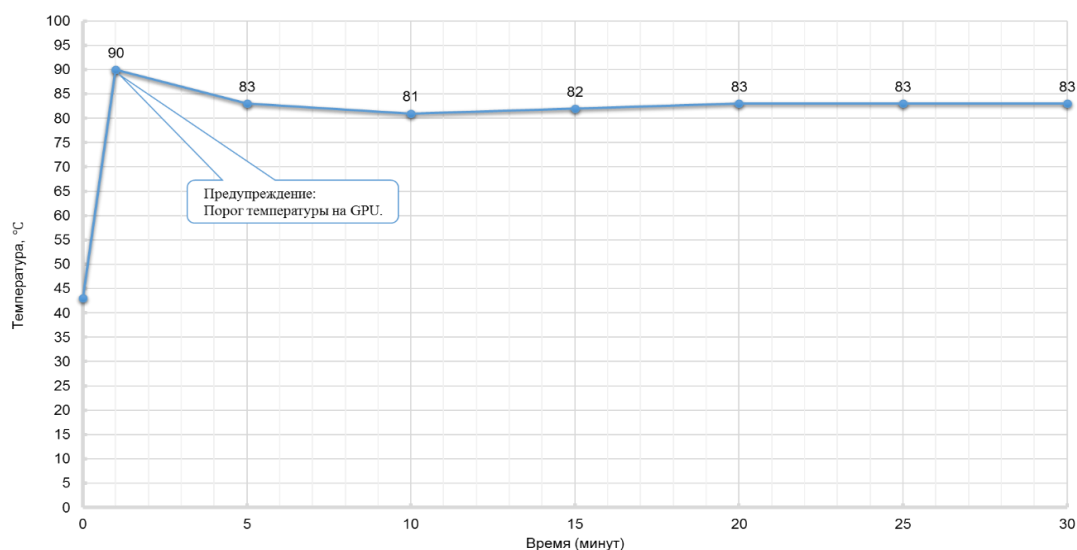


Рис. 11. Температура видеокарты Nvidia Quadro M6000 при расчете хэш-функций в максимальном режиме в разработанном ПК

Таким образом, наиболее производительные системы для подбора паролей необходимо создавать на базе современных графических процессоров с обеспечением максимального охлаждения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показывают, что для получения несанкционированного доступа к БСПД на базе стандарта 802.11, использующей сертификат безопасности Wi-Fi Protected Access 2, осуществляется перебор паролей к перехваченной информации между точкой доступа и клиентом на этапе рукопожатий. Потенциальный нарушитель будет применять высокопроизводительный вычислительный кластер с использованием графических процессоров.

Результаты проведенных исследований показали, что для повышения безопасности БСПД необходимы надежные механизмы шифрования, а именно WPA2. Беспроводную сеть следует защищать стойким паролем. Кроме того, следует контролировать зону ее действия и видимости так, чтобы она не была доступна к подключению за пределами контролируемой зоны.

Список используемых источников

1. Сборник исследований по практической информационной безопасности: электрон. журнал – 2020. – № 1. – URL: <https://www.ptsecurity.com/upload/corporate/ru-ru/analytics/positive-research-2020-rus.pdf> (дата обращения: 21.12.2020).
2. Wi-Fi Protected Setup: сайт. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Wi-Fi_Protected_Setup (дата обращения: 21.12.2020).
3. Стандарт IEEE 802.11i-2004: сайт. – URL: https://ru.bmstu.wiki/IEEE_802.11i-2004 (дата обращения: 21.12.2020).
4. Технологии современных беспроводных сетей Wi-Fi: учеб. пособие / Е.В. Смирнов [и др.]; под общ. ред. А.В. Пролетарского. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – 446 с. – (Компьютерные системы и сети).

В.Н. Арсеньев,
доктор технических наук, профессор;
А.Б. Петухов;
А.А. Ядренкин,
кандидат технических наук, доцент

ОЦЕНИВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СТОЙКОСТИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ С КОМПЛЕКСИРОВАНИЕМ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ ЭТАПОВ ИСПЫТАНИЙ, ЭКСПЛУАТАЦИИ И ПРИМЕНЕНИЯ

Рассматривается задача оценивания характеристик стойкости бортовой аппаратуры космического аппарата к воздействию факторов космического пространства на основе комплексирования информации, полученной до и после проведения натурных испытаний ее опытных образцов. Предложен метод, при использовании которого учитывается значимость информации, полученной на различных этапах исследований бортовой аппаратуры, и который позволяет повысить качество оценивания характеристик стойкости. В отличие от известных, он инвариантен к априорному закону распределения и достаточно прост для его использования при оценивании не только характеристик стойкости, но и других характеристик бортовой аппаратуры при ограниченных объемах натурных испытаний опытных образцов.

Ключевые слова: космический аппарат, бортовая аппаратура, характеристики стойкости, комплексирование информации.

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшим свойством бортовой аппаратуры (БА) космического аппарата (КА) является стойкость. Она характеризует свойство БА выполнять свои функции и сохранять параметры в пределах норм во время и после действия ионизирующего излучения [1]. Бортовая аппаратура может быть принята в эксплуатацию только в случае удовлетворения всех предъявляемых к ней требований, в том числе и по стойкости. Поэтому одной из основных задач проектирования, разработки и испытаний как отдельных элементов бортовой аппаратуры, так и БА в целом является получение объективных оценок характеристик стойкости. Достоверные данные о реальных значениях этих характеристик получаются в результате испытаний опытных образцов БА [2]. Для получения устойчивых оценок характеристик стойкости необходимо проведение большого числа испытаний. При высокой стоимости опытных образцов, средств проведения и организации испытаний данная задача становится невыполнимой. На практике для оценивания характеристик стойкости широко используются другие методы [2–4]. Наиболее значимые из них – это опытно-теоретические (расчетно-экспериментальные) методы [5], которые позволяют комплексировать информацию о стойкости БА, полученную до проведения натурных испытаний (априорную информацию) и после проведения натурных испытаний (опытную информацию), и получать комбинированные оценки характеристик стойкости [2, 6–8]. Основными ограничениями для использования этих методов чаще всего являются либо необходимость знания априорных законов распределения, либо необходимость определения взаимных корреляционных моментов результатов исследований аппаратуры и ее модели, либо отсутствие проверки на непротиворечивость имеющейся информации, либо сложность определения долей априорных и опытных данных в результирующих оценках характеристик стойкости.

В статье предлагается способ оценивания характеристик стойкости БА КА, подверженной воздействию внешних факторов, на примере оценивания математического ожидания и дисперсии времени безотказной работы БА, когда вероятностные свойства времени описываются гамма-распределением. Данный способ, на наш взгляд, лишен указанных выше ограничений.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Гамма-распределение широко используется в теории надежности, а также при исследованиях стойкости и других свойств аппаратуры для аппроксимации законов распределения, имеющих одновершинный несимметричный вид. Оно является непрерывным аналогом отрицательного биномиального распределения, применяется в задачах оптимального резервирования элементов, при исследованиях долговечности системы и т. д. [3]. Среди частных случаев гамма-распределения необходимо выделить экспоненциальное распределение, хи-квадрат-распределение, распределение Эрланга, используемое для описания распределения времени между отказами сложных технических систем [9].

Рассмотрим бортовую аппаратуру, подверженную воздействию внешних факторов. Предполагается, что случайное время ее безотказной работы (наработки до отказа) $0 < X < \infty$ имеет гамма-распределение с функцией плотности распределения вероятностей [10]

$$\varphi_X(x; \alpha, \beta) = \frac{1}{\Gamma(\alpha + 1)\beta^{\alpha+1}} x^\alpha \exp\left\{-\frac{x}{\beta}\right\}, \quad (1)$$

где α и β – параметры распределения, при этом $\alpha > -1$ и $\beta > 0$;

$\Gamma(\cdot)$ – гамма-функция.

Параметры приведенного выше распределения связаны с математическим ожиданием M и дисперсией D времени X известными соотношениями [10]:

$$M = (\alpha + 1)\beta; \quad D = (\alpha + 1)\beta^2,$$

из которых легко получить

$$\alpha = M^2/D - 1; \quad \beta = D/M. \quad (2)$$

Поскольку M и D характеризуют стойкость БА (в частности, математическое ожидание определяет среднее время ее безотказной работы в условиях воздействия внешних факторов), то в дальнейшем будем называть их *характеристиками стойкости*.

Подстановка выражений (2) в формулу (1) дает новое представление функции плотности распределения (1):

$$\varphi_X(x; M, D) = \frac{1}{\Gamma(M^2/D)(D/M)^{M^2/D}} x^{M^2/D-1} \exp\left\{-\frac{M}{D}x\right\}. \quad (3)$$

До проведения испытаний опытных образцов БА имеются априорные оценки M_a и D_a математического ожидания M и дисперсии D времени X .

По результатам испытаний N_o опытных образцов получены значения $x_i, i = \overline{1, N_o}$, времени безотказной работы БА – X .

Необходимо найти оценки характеристик стойкости БА, которые учитывают результаты ее исследований до и после проведения испытаний опытных образцов. Будем называть эти оценки комбинированными и обозначать M_k и D_k соответственно.

КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИИ О СТОЙКОСТИ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ И ПОЛУЧЕНИЕ КОМБИНИРОВАННЫХ ОЦЕНОК

Комбинированные оценки характеристик стойкости, с одной стороны, должны быть близки к опытным оценкам M_o и D_o , полученным по результатам испытаний и несущим наиболее достоверную информацию о стойкости БА. С другой стороны, они должны учитывать информацию, полученную до проведения испытаний и представленную априорными оценками M_a и D_a характеристик M и D . При этом доля априорной информации в комбинированных оценках должна зависеть от ее близости к опытным данным. Для удовлетворения этих тре-

бований комбинированные оценки характеристик стойкости предлагается определять из условия минимума функционала

$$J = (\boldsymbol{\mu}_o - \boldsymbol{\mu})^T (\boldsymbol{\mu}_o - \boldsymbol{\mu}) + v (\boldsymbol{\mu}_a - \boldsymbol{\mu})^T (\boldsymbol{\mu}_a - \boldsymbol{\mu}), \quad (4)$$

где векторы $\boldsymbol{\mu} = [M \ D]^T$, $\boldsymbol{\mu}_o = [M_o \ D_o]^T$, $\boldsymbol{\mu}_a = [M_a \ D_a]^T$. Верхний индекс «т» обозначает операцию транспонирования; v – отношение правдоподобия для проверки статистической гипотезы $H: \boldsymbol{\mu} = \boldsymbol{\mu}_a$ или, что то же самое, гипотезы $H: M = M_a, D = D_a$.

Иначе

$$\boldsymbol{\mu}_k = \arg \min_{\boldsymbol{\mu}} J = \arg \min_{\boldsymbol{\mu}} \left\{ (\boldsymbol{\mu}_o - \boldsymbol{\mu})^T (\boldsymbol{\mu}_o - \boldsymbol{\mu}) + v (\boldsymbol{\mu}_a - \boldsymbol{\mu})^T (\boldsymbol{\mu}_a - \boldsymbol{\mu}) \right\}.$$

Величина отношения правдоподобия v , входящая в последнее выражение, является мерой отличия результатов априорных исследований от опытных данных и вычисляется по формуле [11]

$$v = \frac{\prod_{i=1}^{N_o} \varphi_X(x_i; M, D) \Big|_{M=M_a, D=D_a}}{\prod_{i=1}^{N_o} \varphi_X(x_i; M, D) \Big|_{M=M_o, D=D_o}} = \prod_{i=1}^{N_o} \frac{\varphi_X(x_i; M_a, D_a)}{\varphi_X(x_i; M_o, D_o)}, \quad (5)$$

где M_o и D_o – оценки максимального правдоподобия характеристик стойкости, полученные по выборке $x_i, i = \overline{1, N_o}$ [12].

Анализируя формулы (4) и (5), становится понятным, что величина отношения правдоподобия является величиной положительной и не превышает 1. Чем ближе v к 1, тем меньше отличие априорных оценок M_a и D_a характеристик стойкости БА от опытных M_o и D_o , а следовательно, тем больше априорная информация влияет на комбинированные оценки M_k и D_k . При $v \approx 1$ результаты априорных и опытных исследований практически совпадают, а при $v \approx 0$ полагается, что модели и (или) характеристики воздействующих на БА факторов, которые использовались при исследовании стойкости аппаратуры до испытаний опытных образцов, не адекватны реальным. В последнем случае априорная информация практически игнорируется.

Опытные оценки M_o и D_o , входящие в формулу (5), определяются из необходимых условий максимума логарифма функции правдоподобия $\prod_{i=1}^{N_o} \varphi_X(x_i; M, D)$ по параметрам M и D [12]:

$$\frac{\partial \ln \prod_{i=1}^{N_o} \varphi_X(x_i; M, D)}{\partial M} \Big|_{M=M_o, D=D_o} = 0; \quad \frac{\partial \ln \prod_{i=1}^{N_o} \varphi_X(x_i; M, D)}{\partial D} \Big|_{M=M_o, D=D_o} = 0,$$

которые эквивалентны двум уравнениям:

$$M_o = \frac{1}{N_o} \sum_{i=1}^{N_o} x_i; \quad \Psi\left(\frac{M_o^2}{D_o}\right) + \ln \frac{D_o}{M_o} = \frac{1}{N_o} \sum_{i=1}^{N_o} \ln x_i, \quad (6)$$

где $\Psi(\cdot)$ – пси-функция [13].

Первое уравнение сразу дает опытную оценку M_o среднего времени безотказной работы БА при воздействии на нее факторов внешней среды. Решение второго уравнения относительно оценки D_o дисперсии может быть получено, например, методом Ньютона [13].

С учетом формул (3) и (6) правая часть выражения (5) принимает вид, удобный для вычисления отношения правдоподобия по имеющимся исходным данным:

$$v = \frac{\Gamma^{N_o} (M_o^2/D_o) (D_o/M_o)^{N_o(M_o^2/D_o)}}{\Gamma^{N_o} (M_a^2/D_a) (D_a/M_a)^{N_o(M_a^2/D_a)}} \exp \left\{ N_o \left[\Psi \left(\frac{M_o^2}{D_o} \right) + \ln \frac{D_o}{M_o} \right] \left(\frac{M_a^2}{D_a} - \frac{M_o^2}{D_o} \right) - N_o M_o \left(\frac{M_a}{D_a} - \frac{M_o}{D_o} \right) \right\}. \quad (7)$$

Как было отмечено выше, комбинированная оценка вектора μ , элементами которого являются характеристики стойкости БА M и D , определяется из условия минимума функционала (4).

Необходимое условие минимума функционала (4) нетрудно получить на основе известного правила дифференцирования скалярной функции J по векторному аргументу μ [14]:

$$\left. \frac{\partial J}{\partial \mu} \right|_{\mu = \mu_k} = -2(\mu_o - \mu_k) - 2v(\mu_a - \mu_k) = 0.$$

Решение уравнения, следующего из этого условия, дает комбинированную оценку вектора μ

$$\mu_k = \frac{\mu_o + v\mu_a}{1+v}$$

и соответствующие комбинированные оценки характеристик стойкости БА:

$$M_k = \frac{M_o + vM_a}{1+v}; \quad D_k = \frac{D_o + vD_a}{1+v}. \quad (8)$$

Рассмотрев формулы (8), можно сделать вывод, что при $v \approx 1$ $M_k \approx \frac{M_o + M_a}{2}$ и $D_k \approx \frac{D_o + D_a}{2}$, а при $v \approx 0$ $M_k \approx M_o$ и $D_k \approx D_o$. Если величина отношения правдоподобия $0 < v < 1$, то в комбинированных оценках комплексирована вся имеющаяся информация о стойкости БА с учетом близости результатов априорных исследований к опытным данным.

Если положить, что априорные и опытные оценки характеристик стойкости несмещенные и величина v неслучайная, то комбинированные оценки также будут несмещенными:

$$\begin{aligned} M[M_k] &= M \left[\frac{M_o + vM_a}{1+v} \right] = \frac{M[M_o] + vM[M_a]}{1+v} = \frac{M + vM}{1+v} = M, \\ M[D_k] &= M \left[\frac{D_o + vD_a}{1+v} \right] = \frac{M[D_o] + vM[D_a]}{1+v} = \frac{D + vD}{1+v} = D, \end{aligned} \quad (9)$$

где $M[\cdot]$ – оператор математического ожидания. При этом дисперсия комбинированной оценки математического ожидания времени безотказной работы БА

$$D[M_k] = \frac{1}{(1+v)^2} (D[M_o] + v^2 D[M_a]), \quad (10)$$

где $D[\cdot]$ – оператор вычисления дисперсии.

Комбинированная оценка M_k будет точнее опытной M_o , если $D[M_k] < D[M_o]$. Можно показать, что данному условию соответствует неравенство

$$D[M_a] < \frac{2+v}{v} D[M_o]. \quad (11)$$

Исходя из анализа формулы (11), становится очевидно, что априорная информация о стойкости БА может быть достаточно грубой с точки зрения величины дисперсии $D[M_a]$ соответствующей ей априорной оценки. Однако учет даже такой информации при выполнении условия (11) позволяет повысить точность оценивания характеристик стойкости.

Это можно показать на примере, заимствовав исходные данные из статьи [15].

ПРИМЕР

Рассмотрим некоторую аппаратуру, подверженную воздействию случайных факторов. Известно, что время X ее безотказной работы имеет гамма-распределение.

Были испытаны 10 опытных образцов ($N_o = 10$). Результаты испытаний представлены значениями наработки до отказа: $x_1 = 1096$ ч, $x_2 = 981$ ч, $x_3 = 766$ ч, $x_4 = 1209$ ч, $x_5 = 993$ ч, $x_6 = 1240$ ч, $x_7 = 1166$ ч, $x_8 = 816$ ч, $x_9 = 718$ ч; $x_{10} = 924$ ч.

В процессе предварительных исследований стойкости аппаратуры получены априорные оценки $M_a = 1100$ ч и $D_a = 40000$ ч² математического ожидания M и дисперсии D времени безотказной работы X .

Необходимо получить комбинированные оценки M_k и D_k характеристик стойкости аппаратуры.

Сначала по результатам испытаний опытных образцов на основе формул (6) определяются опытные оценки характеристик стойкости: $M_o = 991$ ч и $D_o = 32256$ ч². Подстановка их совместно с априорными оценками M_a и D_a в правую часть выражения (7) позволяет вычислить величину отношения правдоподобия $v \approx 0.203$, характеризующего отличие априорных оценок от опытных.

Тогда по формулам (8) определяются комбинированные оценки характеристик стойкости: $M_k = 1009$ ч и $D_k = 33563$ ч².

Поскольку дисперсию опытной оценки M_o времени безотказной работы аппаратуры можно приближенно определить по формуле $D[M_o] \approx \frac{D_o}{N_o} \approx 3226$ ч² [16], то для повышения точности оценивания характеристик стойкости можно использовать априорную информацию, для которой дисперсия априорной оценки удовлетворяет условию (11): $D[M_a] < 35009$ ч². Отсюда следует, что даже достаточно грубая априорная информация позволяет в данном случае повысить точность оценивания характеристик стойкости предложенным методом.

Например, при $D[M_a] = 30000$ ч² ($D[M_a] \gg D[M_o]$) из формулы (10) получается $D[M_k] = 3083$ ч², т. е. $D[M_k] < D[M_o]$. Если же дисперсии априорной M_a и опытной M_o оценок одинаковые ($D[M_a] = D[M_o]$), то выигрыш [8], получаемый за счет комплексирования априорной и опытной информации, составляет $\frac{D[M_o]}{D[M_k]} \approx 1.39$, т. е. дисперсия комбинирован-

ной оценки на 39 % меньше дисперсии опытной оценки, что представляется весьма существенным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод оценивания характеристик стойкости бортовой аппаратуры, подверженной воздействию случайных факторов, позволил объединить информацию, полученную на различных этапах ее исследований. В отличие от известных методов, в полученных комбинированных оценках характеристик стойкости учитывается значимость априорной и опытной информации.

Подход остается неизменным при любых априорных распределениях и достаточно прост для его использования при оценивании не только характеристик стойкости, но и других характеристик БА при ограниченных объемах испытаний опытных образцов.

Список используемых источников

1. ГОСТ 18298-79. Стойкость аппаратуры, комплектующих элементов и материалов радиационная. Термины и определения. – 3 с. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200015274> (дата обращения: 23.04.2021).
2. Теоретические основы испытаний и экспериментальная отработка сложных технических систем: учеб. пособие / Л.Н. Александровская [и др.]. – М.: Логос, 2003. – 736 с.
3. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. – М.: Наука, 1965. – 524 с.
4. Надежность и эффективность в технике: справочник / Б.И. Бельчич [и др.]; под ред. В.И. Патрушева и А.И. Рембезы. – М.: Машиностроение, 1988. – Т. 5: Проектный анализ надежности. – 316 с.
5. ГОСТ 25804.7-83. Аппаратура, устройства и оборудование систем управления технологическими процессами атомных электростанций. Методы оценки соответствия требованиям по стойкости, прочности и устойчивости к внешним воздействующим факторам. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200005061> (дата обращения: 23.04.2021).
6. Буренок В.М., Найденов В.М. Испытательная база: выход из кризиса // Воздушно-космическая оборона. – 2009. – № 1 (44). – С. 18–25.
7. Шаракшанэ А.С. Халецкий А.К., Морозов И.А. Оценка характеристик сложных автоматизированных систем. – М.: Машиностроение, 1993. – 272 с.
8. Арсеньев В.Н., Дубинин Д.П. Обоснование метода оценивания характеристик сложных систем при ограниченном числе натурных испытаний // Оборонный комплекс научно-техническому прогрессу. – 2020. – № 2(146). – С. 30–36.
9. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика: Основы моделирования и первичная обработка данных [справочное издание]. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 471 с.
10. Справочник по теории вероятностей и математической статистике / В.С. Корольок [и др.]. – М.: Наука, 1985. – 640 с.
11. Леман Э. Проверка статистических гипотез. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1979. – 408 с.
12. Пугачев В.С. Теория вероятностей и математическая статистика. – 2-е изд., исправл. и доп. – М.: Физматлит. 2002. – 496 с.
13. Карманов В.Г. Математическое программирование. – 5-е изд. – М.: Физматлит, 2004. – 263 с.
14. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. – 4-е изд. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 552 с.
15. Ардашов А.А., Арсеньев В.Н., Силантьев С.Б. Оценивание характеристик надежности сложной системы при ограниченном объеме экспериментальных данных // Известия вузов. Приборостроение. – 2016. – Т. 59, № 3. – С. 197–201.
16. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: учебник для студ. вузов. – 9-е изд. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 576 с.

Е.В. Басотин*,

кандидат технических наук, доцент;

А.П. Поляков*,

кандидат технических наук, профессор;

О.Л. Шестопалова**,

кандидат технических наук, доцент

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

**МАИ, филиал «Восход», г. Байконур.

ОБОСНОВАНИЕ МОДЕРНИЗАЦИИ СТАРТОВОГО КОМПЛЕКСА С УЧЕТОМ НЕДОПУСТИМОСТИ СНИЖЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

Предложен подход к обоснованию целесообразности модернизации стартового комплекса космического ракетного комплекса, основанный на прогнозировании остаточного срока морального устаревания технологического оборудования по критерию недопустимого снижения эффективности функционирования в процессе длительной эксплуатации. Разработана модель, описывающая снижение во времени эффективности функционирования технологического оборудования стартового комплекса с учетом возрастания временных затрат на устранение отказов устаревающего оборудования. Получены расчетные соотношения для определения оптимального уровня безотказности оборудования по критерию максимума показателя эффективности функционирования.

Ключевые слова: модернизация, стартовый комплекс, моральное устаревание, эффективность функционирования, безотказность.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из особенностей эксплуатации вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ) на современном этапе развития науки, техники и технологий является значительное сокращение сроков морального устаревания как самих образцов вооружения, так и их элементной базы и, как следствие, повышение интереса к вопросам, связанным с обоснованием возможности и целесообразности проведения модернизации вооружения [1, 2].

Для типового стартового комплекса космического ракетного комплекса (СК КРК), выполняющего задачи в интересах Вооруженных сил Российской Федерации, характерны: структурная и функциональная сложность, важность и интенсивность выполняемых задач при одновременной тенденции снижения эффективности функционирования технологического оборудования (ТО).

Для управления техническим состоянием ТО СК КРК, своевременного планирования модернизации оборудования необходимо располагать оценкой срока службы оборудования до наступления момента времени, когда наступает неустраняемое обычными управляющими воздействиями (оперативное диагностирование и устранение отказов, пополнение комплекта запасных инструментов и принадлежностей и т. д.) снижение эффективности функционирования ТО СК КРК

Процесс устойчивого прогрессирующего снижения эффективности функционирования ТО СК КРК обусловлен возрастанием затрат на эксплуатацию и потерями из-за вынужденных простоев, вызванных затратами времени и ресурсов на поиск и устранение отказов оборудования. Таким образом, снижение эффективности функционирования ТО СК КРК обусловлено моральным устареванием оборудования. Определение остаточного срока морального устаревания оборудования позволит повысить обоснованность решений о целесообразности модернизации и скорректировать сроки и объем ее проведения.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТО СК КРК

Предположим, что существует некоторый предельный уровень эффективности функционирования ТО СК КРК – такой уровень, ниже которого дальнейшая эксплуатация оборудования нецелесообразна. Зададим предельно допустимый уровень показателя эффективности функционирования ТО СК КРК как $E_{\text{ПРЭФ}}^{\text{ТО}}$ и введем понятие предельно допустимого состояния ТО СК КРК по критерию недопустимого снижения эффективности функционирования.

Под проектным сроком службы до морального устаревания по критерию недопустимого снижения эффективности функционирования будем понимать интервал времени от начала эксплуатации оборудования до момента достижения предельного состояния по критерию недопустимого снижения эффективности функционирования.

Важной задачей при эксплуатации ТО СК КРК является определение момента наступления предельного состояния по критерию недопустимого снижения эффективности функционирования $T_{\text{ПРЭФ}}$ от текущего момента времени τ . Отсюда вытекает понятие – остаточный срок морального устаревания оборудования по критерию недопустимого снижения эффективности функционирования $T_{\text{ПРЭФ}}(\tau)$.

Под показателем эффективности функционирования ТО СК КРК $E_{\text{ЭФ}}^{\text{ТО}}$ будем понимать отношение величины фактического полезного эффекта $S_{\text{Ф}}^{\text{СК}}(t)$ от функционирования оборудования на интервале $T = [0, t]$ к величине максимально достижимого полезного эффекта $S_{\text{max}}^{\text{СК}}(t)$ на рассматриваемом интервале:

$$E_{\text{ЭФ}}^{\text{ТО}} = \frac{S_{\text{Ф}}^{\text{СК}}(t)}{S_{\text{max}}^{\text{СК}}(t)}. \quad (1)$$

Пусть ТО СК КРК функционирует на некотором временном интервале $T = [0, t]$. Задачей ТО СК КРК является обеспечение запуска РКН, т. е. обеспечение вывода на заданную орбиту полезной нагрузки определенной массы. Удельной производительностью СК будем считать массу полезной нагрузки $M_{\text{ПН}}^{\text{СК}} \left[\frac{\text{кг}}{\text{сут.}} \right]$, выведенной на орбиты за единицу времени интервала $T = [0, t]$. Понятие удельной производительности СК в данной постановке задачи является условным. Условность понятия производительности СК связана с введением допущения – сглаживание ступенчатого вида зависимости массы выведенной полезной нагрузки от времени функционирования СК. Обозначим $S_{\text{ПН}}^{\text{СК}} \left[\frac{\text{руб.}}{\text{кг}} \right]$ удельную монетизированную производительность СК. Тогда максимально достижимая производительность СК $S_{\text{max}}^{\text{СК}}(t)$ без вынужденных неплановых простоев оборудования будет представлять собой величину

$$S_{\text{max}}^{\text{СК}}(t) = M_{\text{ПН}}^{\text{СК}} \times S_{\text{ПН}}^{\text{СК}} \times t. \quad (2)$$

Значение фактического полезного эффекта $S_{\text{Ф}}^{\text{СК}}(t)$ от функционирования СК на интервале $T = [0, t]$ будет меньше максимального на сумму затрат $Z_{\text{С}}^{\text{ТО}}$, вложенных в создание оборудования и затрат $Z_{\text{Э}}^{\text{ТО}}(t)$ на эксплуатацию ТО СК КРК. Кроме того, в процессе эксплуатации возникают вынужденные простои оборудования, следовательно, понесенные потери $Z_{\text{ВП}}^{\text{ТО}}(t)$ также необходимо вычесть из максимально достижимой производительности функционирования СК. Итак, имеем

$$S_{\Phi}^{\text{СК}}(t) = S_{\text{max}}^{\text{СК}}(t) - Z_{\text{C}}^{\text{ТО}} - Z_{\text{Э}}^{\text{ТО}}(t) - Z_{\text{ВП}}^{\text{ТО}}(t). \quad (3)$$

Затраты $Z_{\text{C}}^{\text{ТО}}$ на разработку и создание ТО СК КРК представим в виде

$$Z_{\text{C}}^{\text{ТО}} [P_{\text{ТО}}(t_{\text{зад}})] = Z_{\text{C}}^{\text{осн}} + Z_{\text{C}}^{\text{доп}} [P_{\text{ТО}}(t_{\text{зад}})], \quad (4)$$

где $Z_{\text{C}}^{\text{осн}}$ – основные затраты на создание, включающие в себя проектирование, создание опытных образцов, испытания и т. д.;

$Z_{\text{C}}^{\text{доп}} [P_{\text{ТО}}(t_{\text{зад}})]$ – дополнительные затраты (обоснование выбора элементной базы, проведение ресурсных испытаний и т. д.), связанные с обеспечением на стадии создания ТО СК КРК заданного уровня надежности - уровня вероятности безотказной работы $P_{\text{ТО}}(t_{\text{зад}})$ на интервале $T = [0, t]$.

Проведение исследований по обеспечению заданного уровня вероятности безотказной работы $P_{\text{ТО}}(t_{\text{зад}})$ на стадии создания ТО СК КРК подразумевает сравнение заданного уровня надежности и уровня надежности $P_{\text{отр}}(t_{\text{зад}})$, достигнутого в профильной отрасли для аналогичных по функциональному назначению существующих образцов. В связи с этим мера прогресса при совершенствовании надежности ТО СК КРК может быть охарактеризована отношением $\frac{1 - P_{\text{отр}}(t_{\text{зад}})}{1 - P_{\text{ТО}}(t_{\text{зад}})}$ при условии, что данное отношение больше единицы или равно единице (уровень надежности создаваемого изделия выше, чем у аналогичного).

С учетом сказанного выше составляющая формулы для дополнительных затрат при создании ТО СК КРК из выражения (4) может быть представлена в виде

$$Z_{\text{C}}^{\text{доп}} [P_{\text{ТО}}(t_{\text{зад}})] = Z_{\text{СБ}}^{\text{доп}} \left(\frac{1 - P_{\text{отр}}(t_{\text{зад}})}{1 - P_{\text{ТО}}(t_{\text{зад}})} \right)^{\alpha}, \quad (5)$$

где $Z_{\text{СБ}}^{\text{доп}}$ – дополнительные затраты на стадии создания, связанные с обеспечением достигнутого в отрасли уровня безотказности $P_{\text{отр}}(t_{\text{зад}})$;

α – постоянная, определяемая на основе статистических данных для конкретной отраслевой технологии создания ТО СК КРК.

С учетом выражения (5) формулу (4) запишем в виде

$$Z_{\text{C}}^{\text{ТО}} [P_{\text{ТО}}(t_{\text{зад}})] = Z_{\text{C}}^{\text{осн}} + Z_{\text{СБ}}^{\text{доп}} \left(\frac{1 - P_{\text{отр}}(t_{\text{зад}})}{1 - P_{\text{ТО}}(t_{\text{зад}})} \right)^{\alpha}. \quad (6)$$

Затраты $Z_{\text{Э}}^{\text{ТО}}$ на эксплуатацию ТО СК КРК представим по аналогии с формулой (4), как сумму основных и дополнительных затрат:

$$Z_{\text{Э}}^{\text{ТО}} [P_{\text{ТО}}(t_{\text{зад}})] = Z_{\text{Э}}^{\text{осн}} + Z_{\text{Э}}^{\text{доп}} [P_{\text{ТО}}(t_{\text{зад}})], \quad (7)$$

где $Z_{\text{Э}}^{\text{осн}}$ – основные затраты на эксплуатацию, включающие в себя закупку расходных материалов и комплектующих, оплату работы персонала и поддержание его квалификации, создание необходимых температурно-влажностных и санитарно-гигиенических условий и т.д.;

$Z_{\text{Э}}^{\text{доп}} [P_{\text{ТО}}(t_{\text{зад}})]$ – дополнительные эксплуатационные расходы, включающие в себя проведение технического обслуживания, ремонта, восполнение комплекта запасных инструментов и принадлежностей и т. д., направленные на поддержание работоспособности оборудования на этапе эксплуатации при уровне его безотказности, равном $P_{\text{ТО}}(t_{\text{зад}})$.

Очевидно, что чем ниже фактическая безотказность оборудования, тем больше расходы, так как неизбежно увеличение затрат на дополнительные мероприятия по предотвращению отказов и минимизации их последствий. Предположим, что дополнительные затраты $Z_{\text{Э}}^{\text{доп}} [P_{\text{ТО}}(t_{\text{зад}})]$ на этапе эксплуатации, связанные с необходимостью поддержания работоспособности оборудования при уровне надежности $P_{\text{ТО}}(t_{\text{зад}})$ можно оценить следующим образом:

$$Z_{\text{Э}}^{\text{доп}} [P_{\text{ТО}}(t_{\text{зад}})] = Z_{\text{Э ид}}^{\text{доп}} [1 - P_{\text{ТО}}(t_{\text{зад}})], \quad (8)$$

где $Z_{\text{Э ид}}^{\text{доп}}$ – затраты на эксплуатацию идеально надежной системы.

С учетом формулы (8) выражение (7) запишем в виде

$$Z_{\text{Э}}^{\text{ТО}} [P_{\text{ТО}}(t_{\text{зад}})] = Z_{\text{Э}}^{\text{очн}} + Z_{\text{Э ид}}^{\text{доп}} [1 - P_{\text{ТО}}(t_{\text{зад}})]. \quad (9)$$

Стоимость убытка $Z_{\text{ВП}}^{\text{ТО}}(t)$ от вынужденных простоев оборудования зависит от уровня надежности $P_{\text{ТО}}(t_{\text{зад}})$, который определяет величину интенсивности отказов $\lambda(t)$ элементов ТО СК КРК и среднего времени восстановления работоспособного состояния при отказах $T_{\text{В}}$ или величины интенсивности восстановления работоспособности $\mu(t)$ оборудования.

Следовательно, выражение для определения стоимости убытка можно записать в виде

$$Z_{\text{ВП}}^{\text{ТО}} [P_{\text{ТО}}(t_{\text{зад}}), T_{\text{В}}, t] = S_{\text{max}}^{\text{СК}}(t) \times k_{\text{ВП}}^{\text{ТО}}, \quad (10)$$

где $k_{\text{ВП}}^{\text{ТО}}$ – коэффициент вынужденного простоя ТО СК КРК, определяющий долю времени от величины длительности интервала $T = [0, t]$, в течение которого оборудование не функционирует по назначению вследствие проведения мероприятий по поиску и устранению отказов.

Стационарное значение коэффициента вынужденного простоя может быть рассчитано на основе оценок стационарных значений интенсивности отказов λ и интенсивности восстановления работоспособности оборудования μ [3]:

$$k_{\text{ВП}}^{\text{ТО}} = \frac{\lambda}{\lambda + \mu}. \quad (11)$$

С учетом известной зависимости [4] $P_{\text{ТО}}(t_{\text{зад}}) = \exp[-\lambda \times t_{\text{зад}}]$ для стационарной λ можно записать следующее выражение:

$$\lambda = -\frac{\ln [P_{\text{ТО}}(t_{\text{зад}})]}{t_{\text{зад}}}. \quad (12)$$

Подставив в (10) выражения (2), (11), (12), с учетом того, что интенсивность восстановления работоспособности оборудования μ связана со средним временем восстановления работоспособного состояния при отказах $T_{\text{В}}$ известной зависимостью $\mu = \frac{1}{T_{\text{В}}}$, получим

$$Z_{\text{ВП}}^{\text{ТО}} [P_{\text{ТО}}(t_{\text{зад}}), T_{\text{В}}, t_{\text{зад}}] = M_{\text{ПН}}^{\text{СК}} \times S_{\text{ПН}}^{\text{СК}} \times t_{\text{зад}} \times \frac{T_{\text{В}} \ln [P_{\text{ТО}}(t_{\text{зад}})]}{T_{\text{В}} \ln [P_{\text{ТО}}(t_{\text{зад}})] - t_{\text{зад}}}. \quad (13)$$

Запишем выражение (1), с учетом формул (2), (3), (6), (9) и (13), сгруппировав члены уравнения для удобства дальнейших вычислений, в следующем виде:

$$E_{\text{Эф}}^{\text{ТО}} [P_{\text{ТО}}(t_{\text{зад}}), T_{\text{В}}, t_{\text{зад}}] = \frac{M_{\text{ПН}}^{\text{СК}} \times S_{\text{ПН}}^{\text{СК}} \times t_{\text{зад}} - M_{\text{ПН}}^{\text{СК}} \times S_{\text{ПН}}^{\text{СК}} \times t_{\text{зад}} \frac{T_{\text{В}} \ln [P_{\text{ТО}}(t_{\text{зад}})]}{T_{\text{В}} \ln [P_{\text{ТО}}(t_{\text{зад}})] - t_{\text{зад}}}}{M_{\text{ПН}}^{\text{СК}} \times S_{\text{ПН}}^{\text{СК}} \times t_{\text{зад}}} \quad (14)$$

$$-\frac{Z_C^{осн} + Z_{\mathcal{E}}^{осн}}{M_{ПН}^{СК} \times S_{ПН}^{СК} \times t_{зад}} - \frac{Z_{СБ}^{доп} \left(\frac{1 - P_{отр}(t_{зад})}{1 - P_{ТО}(t_{зад})} \right)^{\alpha}}{M_{ПН}^{СК} \times S_{ПН}^{СК} \times t_{зад}} - \frac{Z_{\mathcal{E} ид}^{доп} [1 - P_{ТО}(t_{зад})]}{M_{ПН}^{СК} \times S_{ПН}^{СК} \times t_{зад}}.$$

После проведения преобразований, выражение (14) примет вид

$$E_{\mathcal{E}ф}^{ТО} [P_{ТО}(t_{зад}), T_B, t_{зад}] = 1 - \frac{T_B \ln [P_{ТО}(t_{зад})]}{T_B \ln [P_{ТО}(t_{зад})] - t_{зад}} - \frac{Z_C^{осн} + Z_{\mathcal{E}}^{осн}}{M_{ПН}^{СК} \times S_{ПН}^{СК} \times t_{зад}} - \frac{Z_{СБ}^{доп} \left(\frac{1 - P_{отр}(t_{зад})}{1 - P_{ТО}(t_{зад})} \right)^{\alpha}}{M_{ПН}^{СК} \times S_{ПН}^{СК} \times t_{зад}} - \frac{Z_{\mathcal{E} ид}^{доп} [1 - P_{ТО}(t_{зад})]}{M_{ПН}^{СК} \times S_{ПН}^{СК} \times t_{зад}}. \quad (15)$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО УРОВНЯ БЕЗОТКАЗНОСТИ ТО СК КРК ПО КРИТЕРИЮ МАКСИМУМА ПОКАЗАТЕЛЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

Найдя в выражении (15) частную производную $E_{\mathcal{E}ф}^{ТО} [P_{ТО}(t_{зад}), T_B, t_{зад}]$ по $P_{ТО}(t_{зад})$ и приравняв ее к нулю, определим конкретные числовые значений оптимального уровня безотказности ТО СК КРК $P_{ТО}^{opt}(t_{зад}, T_B)$ по критерию максимума показателя эффективности функционирования:

$$\frac{\partial E_{\mathcal{E}ф}^{ТО} [P_{ТО}(t_{зад}), T_B, t_{зад}]}{\partial P_{ТО}(t_{зад})} = \frac{t_{зад}}{P_{ТО}(t_{зад}) \times T_B \times \left\{ \left[\ln P_{ТО}(t_{зад}) \right] - \frac{t_{зад}}{T_B} \right\}^2} - \frac{Z_{СБ}^{доп} \left(\frac{1 - P_{отр}(t_{зад})}{1 - P_{ТО}(t_{зад})} \right)^{\alpha}}{M_{ПН}^{СК} \times S_{ПН}^{СК} \times t_{зад}} \times \frac{\alpha}{\left(1 - P_{отр}(t_{зад}) \right)^{\alpha+1}} + \frac{Z_{\mathcal{E} ид}^{доп}}{M_{ПН}^{СК} \times S_{ПН}^{СК} \times t_{зад}}. \quad (16)$$

Графики зависимости производной $\frac{\partial E_{\mathcal{E}ф}^{ТО} [P_{ТО}(t_{зад}), T_B, t_{зад}]}{\partial P_{ТО}(t_{зад})}$ от $P_{ТО}(t_{зад})$ при различных

значениях среднего времени восстановления работоспособности T_B представлены на рис. 1. Оптимальные значения $P_{ТО}^{opt}(t_{зад}, T_B)$ определяются по точкам пересечения графиков вероятности безотказной работы с осью абсцисс.

Предположим, что в процессе создания ТО СК КРК было достигнуто некоторое начальное значение среднего времени восстановления работоспособного состояния T'_B и с помощью зависимостей, показанных на рис. 1, на некотором заданном интервале $t'_{зад}$ определено условно-оптимальное значение показателя безотказности $P_{ТО}^{opt}(t'_{зад}, T'_B)$. Тогда для любого заданного времени эксплуатации $t_{зад}$ можно оценить величину показателя эффективности функционирования ТО СК КРК $E_{\mathcal{E}ф}^{ТО} [P_{ТО}^{opt}, T'_B, t_{зад}]$.

Данное предположение справедливо для такого периода эксплуатации ТО СК КРК, в течение которого величина интенсивности отказов, определяемая на основе выражения (12) как

$$\lambda' = -\frac{\ln \left[P_{\text{ТО}}^{\text{opt}}(t'_{\text{зад}}) \right]}{t'_{\text{зад}}}, \quad (17)$$

и величина интенсивности восстановления работоспособного состояния оборудования, определяемая как

$$\mu' = \frac{1}{T'_B}, \quad (18)$$

остаются неизменными, т. е. для периода «нормальной эксплуатации».

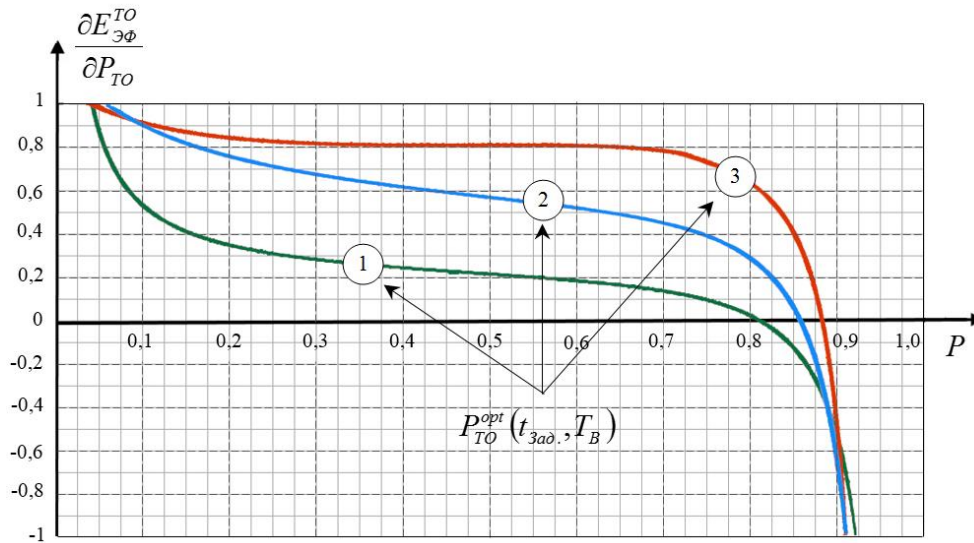


Рис. 1. Графики зависимости показателя $\frac{\partial E_{\text{эф}}^{\text{ТО}}}{\partial P_{\text{ТО}}}$ от $P_{\text{ТО}}$ при значениях среднего времени восстановления работоспособности $T_B = 5$ сут. (кривая 1), $T_B = 15$ сут. (кривая 2), $T_B = 25$ сут. (кривая 3)

Однако в условиях длительной эксплуатации ТО СК КРК происходит накопление дефектов и отклонений от нормы параметров функционирования элементов ТО, что приводит к росту величины интенсивности отказов во времени. Изменение во времени параметров интенсивности отказов можно описать функцией вида

$$\lambda(t) = \lambda' + k_{\lambda} t = k_{\lambda} t - \frac{\ln \left[P_{\text{ТО}}^{\text{opt}}(t'_{\text{зад}}) \right]}{t'_{\text{зад}}}, \quad (19)$$

где k_{λ} – коэффициент, характеризующий отклонение интенсивности отказов.

С течением времени нарушается система восполнения комплекта запасных инструментов и принадлежностей (ЗИП), так как ряд элементов ТО являются уникальными изделиями и морально устаревшими, их доступность для восполнения комплекта ЗИП снижается в связи с прекращением производства. Эти обстоятельства приводят к увеличению времени поиска и поставки запасных элементов и, как следствие, увеличивают риск возникновения неустранимых отказов оборудования. Снижение во времени величины интенсивности восстановления работоспособного состояния ТО СК КРК можно описать функцией вида

$$\mu(t) = \mu' - k_{\mu}t = \frac{1}{T'_B} - k_{\mu}t, \tag{20}$$

где k_{μ} – коэффициент, характеризующий отклонение интенсивности восстановления работоспособности.

Для получения выражения, описывающего изменение во времени коэффициента вынужденного простоя, подставим формулы (19), (20) в выражение (11):

$$k_{\text{ВП}}^{\text{ТО}}(t) = \frac{\lambda(t)}{\lambda(t) + \mu(t)} = \frac{k_{\lambda}t - \frac{\ln[P_{\text{ТО}}^{\text{opt}}(t'_{\text{зад}})]}{t'_{\text{зад}}}}{k_{\lambda}t - \frac{\ln[P_{\text{ТО}}^{\text{opt}}(t'_{\text{зад}})]}{t'_{\text{зад}}} + \frac{1}{T'_B} - k_{\mu}t}. \tag{21}$$

Вероятность безотказной работы при возрастающей во времени интенсивности отказа (19) ТО СК КРК будет определяться как

$$P_{\text{ТО}}(t) = e^{-\lambda(t) \times t} = e^{-\left\{k_{\lambda}t - \frac{\ln[P_{\text{ТО}}^{\text{opt}}(t'_{\text{зад}})]}{t'_{\text{зад}}}\right\} \times t} = e^{-\left\{\frac{\ln[P_{\text{ТО}}^{\text{opt}}(t'_{\text{зад}})]}{t'_{\text{зад}}} \times t - k_{\lambda}t^2\right\}}. \tag{22}$$

Подставив (21) и (22) в выражение (15), получим выражение для описания изменения во времени показателя эффективности функционирования ТО СК КРК с учетом возрастания параметра интенсивности отказа и уменьшения параметра интенсивности восстановления:

$$E_{\text{Эф}}^{\text{ТО}}[t, k_{\lambda}, k_{\mu}] = 1 - \frac{k_{\lambda}t - \frac{\ln[P_{\text{ТО}}^{\text{opt}}(t'_{\text{зад}})]}{t'_{\text{зад}}}}{k_{\lambda}t - \frac{\ln[P_{\text{ТО}}^{\text{opt}}(t'_{\text{зад}})]}{t'_{\text{зад}}} + \frac{1}{T'_B} - k_{\mu}t} - \frac{Z_{\text{С}}^{\text{очн}} + Z_{\text{Э}}^{\text{очн}}}{M_{\text{ПН}}^{\text{СК}} \times S_{\text{ПН}}^{\text{СК}} \times t_{\text{зад}}} - \frac{Z_{\text{СБ}}^{\text{доп}}}{M_{\text{ПН}}^{\text{СК}} \times S_{\text{ПН}}^{\text{СК}} \times t_{\text{зад}}} \left(\frac{1 - P_{\text{отр}}(t'_{\text{зад}})}{1 - P_{\text{ТО}}^{\text{opt}}(t'_{\text{зад}})} \right)^{\alpha} - \frac{Z_{\text{Э ид}}^{\text{доп}}}{M_{\text{ПН}}^{\text{СК}} \times S_{\text{ПН}}^{\text{СК}} \times t_{\text{зад}}} \left[1 - e^{-\left\{\frac{\ln[P_{\text{ТО}}^{\text{opt}}(t'_{\text{зад}})]}{t'_{\text{зад}}} \times t - k_{\lambda}t^2\right\}} \right]. \tag{23}$$

Зависимость среднего времени восстановления работоспособности ТО СК КРК от времени эксплуатации можно представить в виде

$$T_{\text{В}}(t) = T'_B + k_{T_{\text{В}}}t, \tag{24}$$

где $k_{T_{\text{В}}}$ – коэффициент, характеризующий отклонение среднего времени восстановления работоспособности. Тогда, с учетом формулы (24) выражение (21) примет вид

$$k_{\text{ВП}}^{\text{ТО}} = \frac{\lambda(t)}{\lambda(t) + \frac{1}{T_{\text{В}}}} = \frac{k_{\lambda}t - \frac{\ln[P_{\text{ТО}}^{\text{opt}}(t'_{\text{зад}})]}{t'_{\text{зад}}}}{k_{\lambda}t - \frac{\ln[P_{\text{ТО}}^{\text{opt}}(t'_{\text{зад}})]}{t'_{\text{зад}}} + \frac{1}{T'_B + k_{T_{\text{В}}}t}}. \tag{25}$$

В итоге выражение (23) примет следующий вид:

$$E_{\text{ЭФ}}^{\text{ТО}} [t, k_{\lambda}, k_{T_B}] = 1 - \frac{k_{\lambda} t - \frac{\ln [P_{\text{ТО}}^{\text{opt}} (t'_{\text{зад}})]}{t'_{\text{зад}}}}{k_{\lambda} t - \frac{\ln [P_{\text{ТО}}^{\text{opt}} (t'_{\text{зад}})]}{t'_{\text{зад}}} + \frac{1}{T'_B + k_{T_B} t}} - \frac{Z_{\text{С}}^{\text{очн}} + Z_{\text{Э}}^{\text{очн}}}{M_{\text{ПН}}^{\text{СК}} \times S_{\text{ПН}}^{\text{СК}} \times t} - \frac{Z_{\text{СБ}}^{\text{доп}}}{M_{\text{ПН}}^{\text{СК}} \times S_{\text{ПН}}^{\text{СК}} \times t_{\text{зад}}} \left(\frac{1 - P_{\text{отр}} (t'_{\text{зад}})}{1 - P_{\text{ТО}}^{\text{opt}} (t'_{\text{зад}})} \right)^{\alpha} - \frac{Z_{\text{Э ид}}^{\text{доп}}}{M_{\text{ПН}}^{\text{СК}} \times S_{\text{ПН}}^{\text{СК}} \times t} \left[1 - e^{\left\{ \frac{\ln [P_{\text{ТО}}^{\text{opt}} (t'_{\text{зад}})]}{t'_{\text{зад}}} \times t - k_{\lambda} t^2 \right\}} \right].$$

ПОРЯДОК ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО СРОКА МОРАЛЬНОГО УСТАРЕВАНИЯ ТО СК КРК ПО КРИТЕРИЮ НЕДОПУСТИМОГО СНИЖЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

Графическая интерпретация разработанного способа прогнозирования остаточного срока морального устаревания ТО СК КРК по критерию недопустимого снижения эффективности функционирования представлена на рис. 2.

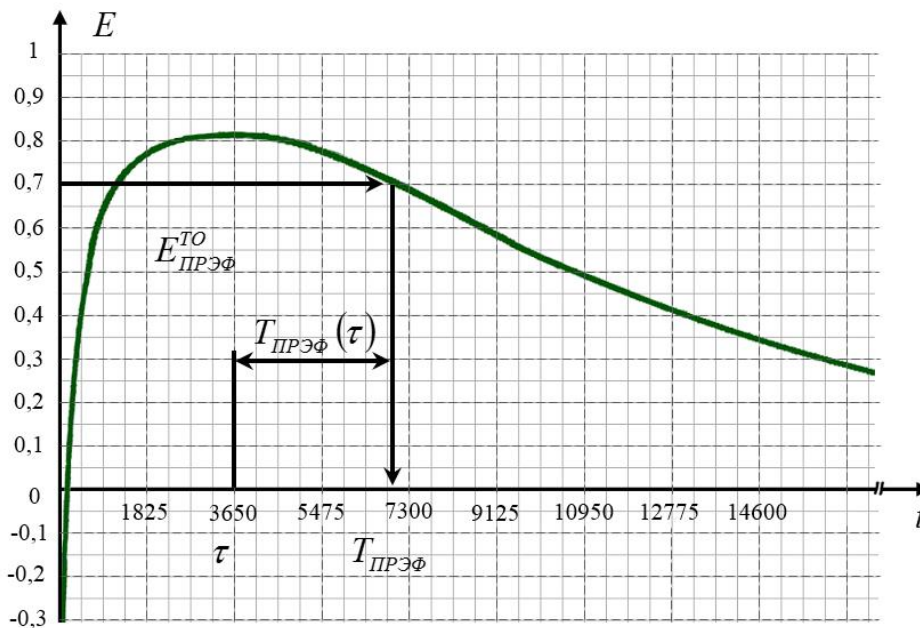


Рис. 2. Схема оценивания проектного и остаточного срока морального устаревания ТО СК КРК по критерию недопустимого снижения эффективности функционирования на основе зависимости показателя $E_{\text{ЭФ}}^{\text{ТО}} [t, k_{\lambda}, k_{T_B}]$ от времени

$$\text{при } k_{\lambda} = 1,4 \times 10^{-6}, k_{T_B} = 2,1 \times 10^{-4}, T'_B = 5 \text{ сут.}, E_{\text{ПРЭФ}}^{\text{ТО}} = 0,7$$

Порядок прогнозирования остаточного срока морального устаревания ТО СК КРК по критерию недопустимого снижения эффективности функционирования может состоять из последовательности ряда этапов.

1. Определение текущих значений интенсивностей отказа k_{λ}^t и среднего времени восстановления работоспособного состояния $k_{T_B}^t$ ТО СК КРК.

2. Адаптация зависимостей интенсивности отказа $\lambda^*(t) = \lambda' + k_\lambda^\tau t$ и среднего времени восстановления работоспособного состояния $T_B^*(t) = T_B' + k_{T_B}^\tau t = \frac{1}{T_B'} - k_\mu^\tau t$ к их текущим значениям.

3. Уточнение аналитической зависимости функции $E_{\text{ЭФ}}^{\text{ТО}}[t, k_\lambda^\tau, k_{T_B}^\tau]$ изменения показателя эффективности функционирования от времени путем учета новых данных k_λ^τ и $k_{T_B}^\tau$.

4. Задание значения предельно допустимого уровня показателя эффективности функционирования ТО СК КРК $E_{\text{ПРЭФ}}^{\text{ТО}}$.

5. Решение уравнения $E_{\text{ЭФ}}^{\text{ТО}}(T_{\text{ПРЭФ}}, k_\lambda^\tau, k_{T_B}^\tau) = E_{\text{ПРЭФ}}^{\text{ТО}}$ относительно $T_{\text{ПРЭФ}}$ при условии $\frac{\partial E_{\text{ЭФ}}^{\text{ТО}}(T_{\text{ПРЭФ}}, k_\lambda^\tau, k_{T_B}^\tau)}{\partial t} < 0$.

6. Расчет прогнозного значения остаточного срока морального устаревания ТО СК КРК по критерию неустранимого снижения эффективности функционирования $T_{\text{ПРЭФ}}(\tau)$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе описан подход к обоснованию целесообразности модернизации СК КРК, в основе которого лежит процесс прогнозирования остаточного срока морального устаревания ТО по критерию недопустимого снижения эффективности функционирования.

Рассмотрены основные понятия и математические выражения, необходимые для оценивания проектного и остаточного срока морального устаревания ТО СК КРК. Разработанная и представленная модель позволяет учитывать влияние вынужденных простоев, которые связаны с необходимостью поиска и устранения отказов и неисправностей, обусловленных прогрессирующим моральным устареванием оборудования, на снижение эффективности функционирования ТО СК КРК.

Полученные с использованием разработанной модели прогнозные оценки остаточного срока морального устаревания позволят своевременно обосновать потребность и целесообразность модернизации ТО СК КРК. При использовании модели в процессе разработки нового оборудования прогнозные оценки проектного срока морального устаревания позволят сравнивать различные варианты проектных решений разрабатываемых систем между собой.

Список используемых источников

1. Буренок В. Модернизация как важная научная и производственная проблема // Воздушно-космическая оборона. – 2009. – №05. – С. 14–21.
2. Литвиненко В.В., Урюпин В.Н., Солдатов А.Н. Методологические аспекты модернизации образцов вооружения, военной и специальной техники. Задачи, виды и принципы модернизации // Военная мысль. – 2018. – № 10. – С. 53–62.
3. Обеспечение надежности сложных технических систем: учебник / А.Н Дорохов [и др.]. – СПб.: Лань, 2017. – 352 с.
4. Справочник по эксплуатации космических средств / Л.Т. Баранов [и др.]; под ред. А.П. Полякова. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2006. – 758 с.

А.И. Башилов*,
доктор технических наук, профессор;

М.В. Огороков**,
кандидат технических наук;

Б.И. Сухорученков**,
доктор технических наук, профессор

*АО «Корпорация «Московский институт теплотехники» по качеству», г. Москва.

** Военная академия РВСН имени Петра Великого,
Московская обл., г. Балашиха.

МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ БЕЗОТКАЗНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОДНОКРАТНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ С УЧЕТОМ ДЕФЕКТОВ

Предложен новый метод статистического оценивания динамики вероятности безотказной работы технических систем (ТС) одноразового использования в процессе отработочных испытаний с учетом выявляемых и возможных невыявленных (скрытых) дефектов. Получены оценки для вероятностей числа возможных невыявленных (скрытых) дефектов при ограниченном объеме отработочных испытаний ТС.

Ключевые слова: техническая система одноразового использования, возможные дефекты, вероятности проявления дефектов, оценки показателей безотказности.

ВВЕДЕНИЕ

Рассматриваются технические системы (ТС) одноразового использования с фиксированным периодом целевого функционирования, которые в процессе работы могут иметь переменную структуру. Примерами таких систем являются баллистические, зенитные и крылатые ракеты и ракеты-носители космического назначения. Для приема ТС в эксплуатацию осуществляется контроль безотказности ТС на основе цикла натурных испытаний. Для чего по результатам отработки ТС оцениваются показатели безотказности (ПБ) статистическими методами. В период отработки ТС одноразового использования определяющим ПБ является вероятность безотказной работы (ВБР) в течение заданного периода выполнения целевой задачи (ЦЗ). Проблема оценивания ВБР ТС осложняется тем, что в процессе испытаний из-за различных изменений конструкции ТС и проведения доработок ВБР изменяется.

Основные трудности возникают вследствие наличия различного рода возможных дефектов, которые могут снижать показатели безотказности ТС. Поэтому на протяжении всего жизненного цикла ТС осуществляются мероприятия по выявлению и устранению возможных дефектов ТС и их подсистем. Однако практика показывает, что полностью исключить дефекты не всегда удается. Соответственно, для корректного оценивания и достоверного контроля ВБР по результатам испытаний необходимо учитывать возможные дефекты ТС.

Как показано в работах [6, 14], дефекты могут иметь различную природу проявления при работе ТС. Наиболее опасными являются дефекты, которые не были выявлены на предыдущих этапах отработки [4, 7, 13]. Далее рассматриваются именно такие дефекты. Если в процессе испытаний происходит отказ ТС из-за дефекта, то он может быть выявлен и устранен на основе проведения эффективных доработок.

Вместе с тем при недостаточном объеме натурных испытаний ТС обнаружить все возможные дефекты достаточно трудно. Опасность наличия дефектов, имеющих высокую вероятность не проявления, заключается в том, что они могут проявиться уже в период эксплуатации ТС и привести к авариям и даже к катастрофам. Поэтому возникает актуальная задача – оценить по результатам испытаний показатели выявляемых и, что особенно важно,

возможных невыявленных дефектов ТС. Методы решения этой задачи рассматривались в работах [2, 10, 14], но в них не учитывалось распределение вероятности возможных оставшихся дефектов.

Для повышения достоверности оценивания ВБР ТС проводится обоснование методов оценивания ВБР ТС однократного использования с учетом вероятностных свойств возможных дефектов на основе результатов цикла натурных испытаний. При этом приняты следующие допущения:

- определяющим ПБ ТС является ВБР в течение периода выполнения ЦЗ;
- натурные испытания ТС проводятся только в течение фиксированного периода ЦЗ;
- результаты натурных испытаний ТС взаимно независимы;
- ТС может иметь дефекты, которые при испытаниях проявляются случайным образом независимо друг от друга, после чего они полностью устраняются на основе доработок;
- начальное число возможных дефектов ТС не превышает объема отработки;
- при каждом испытании ТС может быть выявлено не более одного дефекта;
- при испытаниях ТС могут быть выявлены не все возможные дефекты.

МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ ТС ОДНОРАЗОВОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ПРОЦЕССЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ С УЧЕТОМ ДЕФЕКТОВ

Технические системы однократного использования в процессе работы могут изменять свою структуру [4, 7]. Например, баллистическая ракета и ракета-носитель космического назначения имеют несколько ступеней, которые работают последовательно [7]. Такие ТС на каждом отрезке работы имеют разные интенсивности отказов. В этом случае безотказность ТС удобно характеризовать ВБР в течение периода T выполнения поставленной задачи. Далее будем предполагать, что период T для каждого образца ТС практически стабильный. Обозначим ВБР самой ТС $P_C(T)$ (при отсутствии дефектов) в виде P_C . Если имеются q -е дефекты, то вероятности не проявления дефектов (ВНД) в течение периода T обозначим в виде $P_q, q = 1, \dots, Q$.

Для контроля безотказности ТС проводится цикл последовательных i -х испытаний ТС, $i = 1, \dots, n$. В каждом номере испытаний фиксируются успешные испытания и испытания i , при которых произошли отказы ТС. Если причина отказа не установлена, то отказ при $i = i_{\text{сл}}$ испытании признается случайным. Если в i_q -м испытании произошел отказ ТС из-за дефекта, то проводятся доработки ТС и дефект полностью устраняется так, что ВНД становится равной единице: $P_q = 1$. Опыт эксплуатации ТС показывает, что после ограниченного числа отработки может остаться $R \geq 0$ невыявленных дефектов. Обозначим вероятности не проявления таких дефектов в виде $P_r, r = 0, \dots, R$. Предполагается, что дефекты взаимно независимы. На основе принятых обозначений модель динамики ВБР ТС с учетом возможных дефектов в процессе i -х испытаний строится по зависимости

$$P_{\Sigma}(i) = P_C \cdot \left[\prod_{q=1}^Q P_q(i) \right] \cdot \prod_{r=0}^R P_r, \quad (1)$$

где $P_q(i) = P_q$ при $i \leq i_q$; $P_q(i) = 1$ при $i > i_q$.

В зависимости (1) и в дальнейшем при $r = 0$ значение $P_r = 1$. Для построения динамики ВБР ТС необходимо иметь параметры модели (1), которые возможно оценить только по результатам отработочных испытаний.

МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ НЕИЗВЕСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ВБР ТС ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ

Так как параметры математической модели (1) обычно неизвестны, то их можно оценить по результатам обработки на основе экспериментальных методов, которые используются в теории надежности [1, 3–6, 8, 10]. Теоретической основой данных методов являются статистические методы [1, 3–13]. В работе [11] доказывается, что наибольшая точность оценивания случайных характеристик ТС по результатам обработки обеспечивается за счет статистического метода несмещенных оценок (МНО). Для его применения при оценивании параметров модели (1) рассмотрим вероятности возможных результатов (событий) в процессе испытаний ТС. Вероятность успешного испытания (безотказной работы ТС) при $i = i_y$ -м испытании с учетом всех возможных дефектов составит $\text{Вер}(i_y) = {}_c P_q P_r$.

Вероятность случайного отказа ТС при $i = i_{\text{сл}}$ -м испытании определяется по зависимости $\text{Вер}(i_{\text{сл}}) = (1 - P_C) P_q P_r$. Вероятность отказа ТС вследствие q -го дефекта при $i = i_q$ -м испытании $\text{Вер}(i_q) = P_C (1 - P_q) P_r$. На основе этих вероятностей с учетом модели (1) априорная вероятность возможных результатов n испытаний ТС при их взаимной независимости определяется на основе произведения отмеченных вероятностей как для нерезервированной ТС. После некоторых преобразований получается следующая зависимость:

$$\text{Вер}(n, m, \{i_q\}, R) = P_C^{n-m} \cdot (1 - P_C)^m \cdot \left[\prod_{q=1}^Q P_q^{i_q-1} (1 - P_q) \right] \cdot \prod_{r=0}^R P_r^n, \quad (2)$$

где m – число случайных отказов.

Если ВБР ТС P_C , ВНД $\{P_q\}$ и $\{P_r\}$ и число R возможных оставшихся дефектов неизвестны, но зафиксированы номера испытаний $i_{\text{сл}}$ и i_q , то в соответствии с МНО [11] можно построить плотности вероятности (ПВ) возможных оценок неизвестных параметров p_C , p_q и p_r по зависимости

$$f_{\Sigma}(p_C, \{p_q\}, \{p_r\} / R) = k \cdot p_C^{n-m} \cdot (1 - p_C)^m \cdot \left[\prod_{q=1}^Q p_q^{i_q-1} (1 - p_q) \right] \cdot \prod_{r=0}^R p_r^n, \quad (3)$$

где k – нормирующий коэффициент.

Возможные оценки вероятностей числа оставшихся (невявленных) при ограниченных объемах отработочных испытаний дефектов R_K определяются по зависимости (2) с учетом оценок других параметров:

$$\text{Вер}(R_K / p_C, \{p_q\}, \{p_r\}) = k_R \cdot p_C^{n-m} \cdot (1 - p_C)^m \cdot \left[\prod_{q=1}^Q p_q^{i_q-1} (1 - p_q) \right] \cdot \prod_{r=0}^{R_K} p_r^n, \quad (4)$$

где k_R – нормирующий коэффициент, который обеспечивает условие нормировки вероятностей числа возможных невявленных дефектов.

Из структуры ПВ (3) следует возможность представить ее в виде произведения отдельных (независимых) ПВ оценок параметров следующим образом:

$$f_{\Sigma}(p_C, \{p_q\}, \{p_r\}, R_o) = f_C(p_C) \cdot \left[\prod_{q=1}^Q f_q(p_q) \right] \cdot \prod_{r=0}^{R_K} f_r(p_r), \quad (5)$$

где автономные ПВ оценок параметров имеют вид:

$$f_C(p_C) = k_C \cdot p_C^{n-m} \cdot (1 - p_C)^m; \quad (6)$$

$$f_q(p_q) = k_q \cdot p_q^{i_q-1} (1 - p_q), q = 1, \dots, Q; \quad (7)$$

$$f_r(p_r) = k_r \cdot p_r^n, r = 1, \dots, R_K. \quad (8)$$

Здесь k_C, k_q, k_r – нормирующие коэффициенты, которые определяются по зависимостям:

$$k_C^{-1} = \int_0^1 p_C^{n-m} \cdot (1-p_C)^m dp_C; \quad (9)$$

$$k_q^{-1} = \int_0^1 p_q^{i_q-1} (1-p_q) dp_q, q = 1, \dots, Q; \quad (10)$$

$$k_r^{-1} = \int_0^1 p_r^n dp_r, r = 1, \dots, R_K. \quad (11)$$

После проведенных преобразований ПВ (6)–(8) с учетом нормирующих коэффициентов (9)–(11) получаются простые конечные зависимости для отдельных (автономных) ПВ оценок неизвестных параметров математической модели (1):

$$f_C(p_C) = (n+1) C_n^m p_C^{n-m} (1-p_C)^m; \quad (12)$$

$$f_q(p_q) = (i_q+1) i_q p_q^{i_q-1} (1-p_q), q = 1, \dots, Q; \quad (13)$$

$$f_r(p_r) = (n+1) p_r^n, r = 1, \dots, R_K. \quad (14)$$

Несмещенные оценки параметров модели (1) и их погрешности в виде среднеквадратических отклонений (СКО) определяются на основе построенных плотностей вероятности (12)–(14) как первые моменты распределения случайных величин [3, 11]:

$$\bar{P}_C = \int_0^1 p_C f_C(p_C) dp_C = \frac{n+1-m}{n+2}; \quad (15)$$

$$\sigma_{\bar{P}_C}^2 = \int_0^1 (p_C - \bar{P}_C)^2 f_C(p_C) dp_C = \frac{(m+1)(n+1-m)}{(n+2)^2(n+3)}; \quad (16)$$

$$\bar{P}_q = \int_0^1 p_q f_q(p_q) dp_q = \frac{i_q}{i_q+2}, q = 1, \dots, Q_B; \quad (17)$$

$$\sigma_{\bar{P}_q}^2 = \int_0^1 (p_q - \bar{P}_q)^2 f_q(p_q) dp_q = \frac{2i_q}{(i_q+2)^2(i_q+3)}, q = 1, \dots, Q_B; \quad (18)$$

$$\bar{P}_r = \int_0^1 p_r f_r(p_r) dp_r = \frac{n+1}{n+2}, r = 1, \dots, R_K; \quad (19)$$

$$\sigma_{\bar{P}_r}^2 = \int_0^1 (p_r - \bar{P}_r)^2 f_r(p_r) dp_r = \frac{n+1}{(n+2)^2(n+3)}, r = 1, \dots, R_K. \quad (20)$$

Анализ зависимостей (19)–(20) показывает, что оценки вероятностей непрявления возможных (ожидаемых) r -х дефектов и их СКО не зависят от их числа и одинаковы для всех дефектов, которые совпадают с оценками, определяемыми по зависимостям (15)–(16) при $m = 0$.

При оценках параметров (15)–(20) можно построить оценку переменной ВБР ТС по модели (1). При этом остается решить проблемную задачу определения числа возможных оставшихся дефектов, которые могут значительно снизить ВБР ТС, особенно после завершения испытаний. Возможные методы решения этой задачи рассматриваются далее. Эти методы основаны на учете априорной информации о результатах эксплуатации ТС, в процессе которой часто выявляются дефекты, оставшиеся после цикла проведенных испытаний.

МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ОЖИДАЕМОГО ЧИСЛА НЕВЫЯВЛЕННЫХ (СКРЫТЫХ) ДЕФЕКТОВ С УЧЕТОМ ВЕРОЯТНОСТЕЙ (4)

Решение задачи определения числа возможных невыявленных дефектов можно обеспечить только с помощью вероятностно-статистического подхода [8]. Для этого необходимо провести достаточное число испытаний ТС, которое должно превышать число возможных оставшихся дефектов. Оценки вероятностей ожидаемого числа невыявленных (скрытых) дефектов можно определить на основе зависимости (4), в которой нормирующий сомножитель определяется по формуле

$$k_R^{-1} = \sum_{R_K=0}^{R_M} p_C^{n-m} \cdot (1-p_C)^m \left[\prod_{q=1}^Q p_q^{i_q-1} (1-p_q) \right] \cdot \prod_{r=0}^{R_K} p_r^n, \quad (21)$$

где R_M – максимально число возможных дефектов.

Значение R_M определяется на основе априорной информации об эксплуатации аналогов и прототипов ТС. Если такая информация отсутствует, то можно задать максимальное значение R_M , при котором вероятность (4) с учетом выражения (22) становится практически равной нулю. После преобразований (4) с учетом (21) получаются простые конечные зависимости для оценок вероятностей ожидаемого числа невыявленных (скрытых) дефектов:

$$\text{Вер}(R_K / \{p_r\}) = \prod_{r=0}^{R_K} p_r^n / \sum_{R_K=0}^{R_M} \prod_{r=0}^{R_K} p_r^n. \quad (22)$$

Из зависимости (22) следует, что вероятности $\text{Вер}(R_K / \{p_r\})$ числа возможных невыявленных дефектов зависят только от числа испытаний и от возможных оценок вероятностей не проявления дефектов (ВНД). Если в качестве оценок ВНД использовать их несмещенные оценки по зависимости (19), которые одинаковы для всех возможных дефектов, то по методу линеаризации получаются простые оперативные зависимости для возможных оценок вероятностей числа невыявленных (скрытых) при отработке дефектов:

$$\tilde{B}(R_K) = \left(\frac{n+1}{n+2} \right)^{n R_K} / \sum_{R_K=0}^{R_M} \left(\frac{n+1}{n+2} \right)^{n R_K}, \quad R_K = 0, 1, \dots, R_M. \quad (23)$$

Анализ зависимости (23) показывает, что значения оценок вероятностей возможного числа невыявленных (скрытых) дефектов, полученных по результатам отработочных испытаний, зависят от числа R_M возможных дефектов, не выявленных на предыдущих этапах отработки, и от объема n проведенных испытаний ТС. Значения $\tilde{B}(R_K)$ при вариациях объемов n отработочных испытаний и максимального числа R_M дефектов показаны на рис. 1. Для лучшего представления изменения вероятностей $\tilde{B}(R_K)$ их значения в дискретных числах дефектов R_K соединены прямыми линиями.

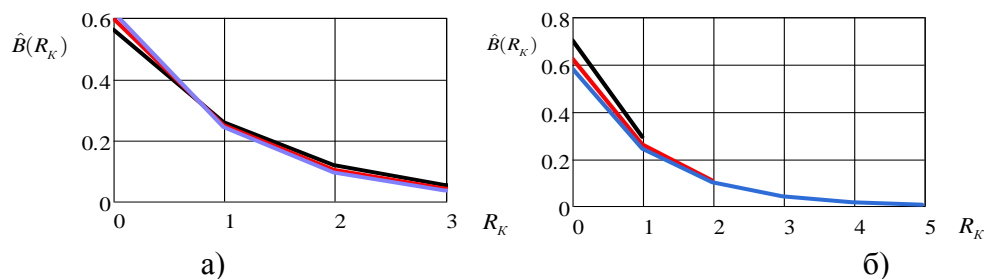


Рис. 1. Значения реализации возможных оценок вероятностей числа невыявленных (скрытых) дефектов:

а – при $R_M = 3$ и вариациях числа испытаний ТС $n = 5$ (черные); $n = 10$ (красные); $n = 20$ (голубые); б – при числе испытаний ТС $n = 10$ и вариациях числа начальных дефектов $R_M = 1$ (черные); $R_M = 2$ (красные); $R_M = 5$ (голубые)

Из анализа рис. 1 следует, что оперативные оценки вероятностей числа оставшихся дефектов практически не зависят от объема отработочных испытаний ТС и от числа R_M . После окончания испытаний ТС при $R_M \in [1; 6]$ и при числах отработки $n \geq 5$, вероятнее всего, останется практически не более одного-двух дефектов. Математическое ожидание числа оставшихся дефектов можно оперативно оценить с учетом (24) по зависимости

$$\tilde{M}[R_K] = \sum_{R_K=0}^{R_M} R_K \cdot \tilde{B}(R_K). \tag{24}$$

Оценки вероятностей числа дефектов по зависимостям (23) и (24), полученные по методу линеаризации, могут иметь смещение. Несмещенные оценки вероятностей можно определить на основе оценок (22) с учетом ПВ $f_r(p_r)$ ВНД (14). Такие оценки и их СКО вычисляются по зависимостям:

$$\bar{B}(R_K) = \int_0^1 (\text{Вер}(R_K / \{p_r\})) \cdot f_r(p_r) dp_r; \tag{25}$$

$$\sigma_{\bar{B}(R_K)}^2 = \int_0^1 (\text{Вер}(R_K / \{p_r\}) - \bar{B}(R_K))^2 \cdot f_r(p_r) dp_r. \tag{26}$$

Реализации несмещенных оценок вероятностей числа возможных оставшихся дефектов при различных числах n отработочных испытаний ТС представлены на рис. 2. Сравнительный анализ рисунков – рис. 2 с рис. 1 – показывает, что несмещенные оценки вероятностей отличаются от оценок, полученных по оперативным зависимостям. При этом возрастают оценки вероятностей повышенного числа оставшихся дефектов. Из анализа рис. 2 можно сделать вывод, что СКО оценок вероятностей имеет значительный уровень по сравнению с вероятностями числа дефектов при $R_K > 2$.

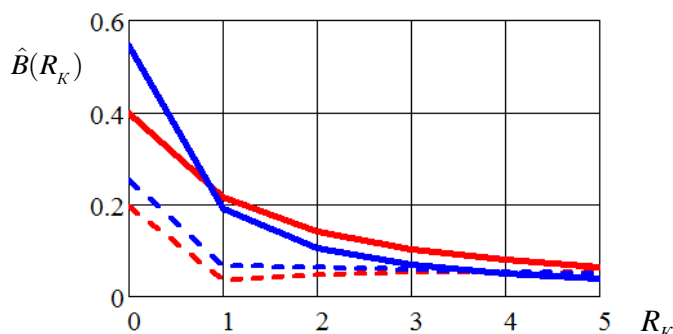


Рис. 2. Реализации оценок вероятностей числа возможных оставшихся дефектов и их СКО при $R_M = 5$ и $n = 10$ (красные) и $n = 20$ (синие)

Реализации оценок МО числа возможных оставшихся дефектов при $R_M = 5$ по оценкам (24) и (25) в зависимости от числа испытаний ТС приведены в табл. 1 с округлением до 0,1. Несмещенные оценки ожидаемого числа оставшихся дефектов по зависимости (25) превышают оценки, полученные оперативным способом по зависимости (24).

Таблица 1

Реализации оценок математического ожидания числа возможных дефектов

n		10	20	50
По методам оценивания ожидаемого числа возможных дефектов	$\tilde{M}[R_K]$	0,7	0,6	0,6
	$\bar{M}[R_K]$	1,1	1,1	1,1
По стат. моделированию	$M_{\text{мод}}[R_K]$	0,8	0,9	0,9

МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ЧИСЛА ВОЗМОЖНЫХ (ОЖИДАЕМЫХ) НЕВЫЯВЛЕННЫХ (СКРЫТЫХ) ДЕФЕКТОВ ПО ВЕРОЯТНОСТЯМ ИХ ПРОЯВЛЕНИЯ

Особенность оценки вероятностей числа возможных непроявившихся (скрытых) при ограниченном объеме испытаний дефектов ТС по методу, изложенному ранее, который состоит в том, что число невыявленных дефектов при испытаниях непосредственно не контролируется. Значение R введено в модель (1) и в зависимость (2) на основе предположения, что после испытаний ТС может остаться $R \geq 1$ дефектов. Это предположение основано на априорной информации об аналогах и прототипах ТС. Богатый опыт создания и эксплуатации образцов авиационных, ракетно-космических систем, автомобильной и другой техники свидетельствует, что после завершения их испытаний уже в период эксплуатации происходили отказы ТС, причиной которых являлись дефекты, не выявленные в процессе испытаний.

Из показателей возможных скрытых дефектов при испытаниях ТС можно оценить только плотности вероятности возможных значений (оценок) P_r вероятности непроявления дефекта (ВНД) при испытаниях. Если такой дефект отсутствует, то для него не может быть и оценки ВНД. Поэтому оценки вероятностей числа возможных (ожидаемых) невыявленных (скрытых) дефектов по зависимостям (23)–(27) являются только возможными.

Для повышения достоверности оценивания показателей возможных скрытых дефектов желательно иметь альтернативные методы. Один из возможных методов, который рассматривается далее, основан на непосредственном анализе вероятностей проявления дефектов (ВПД).

Предположим, что ТС может иметь R дефектов, вероятности проявления которых при каждом испытании одинаковы и составляют G_r , $r = 1, \dots, R$. Если проведено n испытаний и r -й дефект не проявился, то вероятность этого

$$\text{Вер}(r=1) = (1 - G_r)^n. \quad (27)$$

Если число дефектов R меньше числа испытаний и возможности проявления дефектов взаимно независимы, то вероятность непроявления при испытаниях всех дефектов определяется на основе произведения вероятностей (27):

$$\text{Вер}(R) = \prod_{r=1}^R (1 - G_r)^n = (1 - G_r)^{n \cdot R}. \quad (28)$$

Если вероятности G_r и число возможных невыявленных дефектов неизвестны, то вероятности числа оставшихся дефектов в соответствии с МНО пропорциональны вероятностям по зависимости (28), в которой неизвестное число R заменяется на возможное число R_K невыявленных дефектов, а вероятности G_r заменяются на их возможные оценки g_r .

После нормирования при максимальном числе дефектов R_M с учетом возможности отсутствия оставшихся дефектов получаются конечные зависимости для возможных оценок вероятностей числа оставшихся дефектов:

$$\text{Вер}(R_K / q_r) = \frac{(1 - q_r)^{n \cdot R_K}}{\sum_{R_K=0}^{R_M} (1 - q_r)^{n \cdot R_K}}, R_K = 0, 1, \dots, R_M. \quad (29)$$

Полученные зависимости совпадают с вероятностями (22) при одинаковых оценках g_r с учетом взаимосвязи ВПД с оценками ВНД, $g_r = 1 - p_r$. Поэтому оценки числа возможных оставшихся (скрытых) дефектов по изложенному методу практически полностью совпадают с оценками (24), которые получены ранее и показаны на рис. 1 и в табл. 1.

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ЧИСЛА ВОЗМОЖНЫХ (ОЖИДАЕМЫХ) ДЕФЕКТОВ ПО СТАТИСТИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ

Исследование вероятностей ожидаемого числа невыявленных дефектов ТС можно провести и по методу статистического моделирования процесса отработочных испытаний, который рассматривается ниже. Для этого предполагается, что перед отработочными испытаниями в ТС может содержать $R = 5$ дефектов. В каждом испытании каждый возможный дефект может случайно проявиться с вероятностью g_r , которая определяется на основе ПВ ВНД (14) с учетом взаимосвязи $g_r = 1 - p_r$. При этом плотность вероятности и функция распределения вероятности проявления дефекта (ВПД) определяются по зависимостям:

$$f(g_r) = (n+1)(1-g_r)^n;$$

$$F(g_r) = \int_0^{g_r} f(g_r) dg_r. \quad (30)$$

Статистическое моделирование числа возможных оставшихся дефектов производится следующим образом. Фиксируется число испытаний n . В каждом i -м «испытании» по датчику псевдослучайных чисел с равномерным распределением на отрезке $[0; 1]$ получается случайное значение $\xi_i \in R(1)$ и на основе функции распределения (30) определяется возможное значение ВНД g_{ri} в i -м испытании на основе соотношения

$$F(g_{ri}) = \xi_i, \quad i = 1, \dots, n. \quad (31)$$

Согласно полученной ВНД g_{ri} моделируется результат i -го испытания на основе другого случайного числа с равномерным распределением $\zeta_i \in R(1)$. Если полученное значение $\zeta_i < g_{ri}$, то дефект считается выявленным, т. е. в i -м испытании выявляется $r_i = 1$ дефект. Иначе дефект остается невыявленным: $r_i = 0$.

Последовательно моделируются результаты серии i -х испытаний, $i = 1, \dots, n$, и вычисляется число невыявленных дефектов в серии испытаний:

$$R_{Kv} = \sum_{i=1}^n b_i, \quad v = 1, \dots, N, \quad (32)$$

где $b_i = 1$ при $r_i = 0$ и $b_i = 0$ при $r_i = 1$.

Повторяются вычисления по формулам (30)–(32) N раз, накапливаются значения $R_{Kv} \in [0; R]$, $v = 1, \dots, N$. По ним определяются вероятности числа невыявленных (скрытых) дефектов по зависимостям:

$$B_{\text{мод}}(R_K) = N^{-1} \sum_{v=1}^N R_{Kv}, \quad R_{Kv} = R_K = 0; 1, \dots, R. \quad (33)$$

Вероятности (33) при числе испытаний $n = 10$ и 20 , полученные по $N = 10000$ серий «испытаний», показаны на рис. 3. При повторении моделирования зависимости на рис. 3 практически не изменяются. Из динамики вероятностей числа дефектов, показанных на рис. 3, следует, что вероятности числа оставшихся дефектов практически не зависят от объема n испытаний технических систем. Сравнение рис. 3 с рис. 1 и 2 показывает, что оценка вероятности выявления всех дефектов (при $R_K = 0$) по статистическому моделированию значительно ниже, нежели полученная теоритически. Вероятности возможного (ожидаемого) числа оставшихся скрытых дефектов при $R_K \geq 1$ по статистическому моделированию принципиально не отличаются от результатов, полученных теоритически. При $R_K \rightarrow 5$ вероятности $B(R_K)$ приближаются к нулю. Если число возможных начальных дефектов $R < 5$, то значения вероятностей числа полученных по результатам статистического моделирования дефектов необходимо нормировать в пределах $[0; R]$.

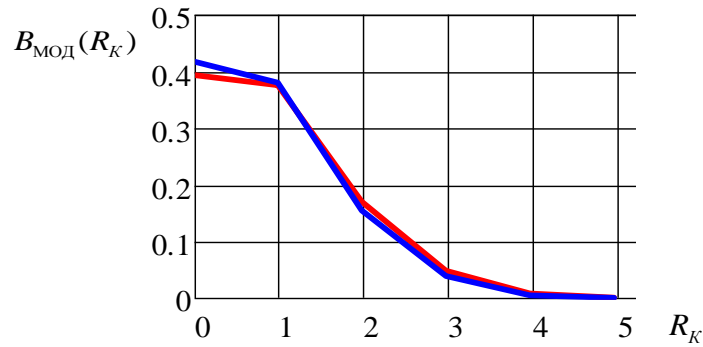


Рис. 3. Значения вероятности числа невыявленных (скрытых) дефектов по результатам статистического моделирования при сериях испытаний ТС $n = 10$ (красная) и $n = 20$ (синяя)

На основе вероятностей (33) можно определить ожидаемое число оставшихся дефектов по статистическому моделированию в соответствии с (24):

$$M_{\text{мод}}[R_K] = \sum_{R_K=0}^{R_M} R_K \cdot B_{\text{мод}}(R_K), R_K = 0; 1, \dots, R. \quad (34)$$

Значения ожидаемого числа оставшихся дефектов по зависимости (34) при вариациях значений n отработочных испытаний ТС показаны в табл. 1. Из анализа рис. 1–3 и данных, приведенных в табл. 1, следует, что с увеличением числа испытаний ожидаемое число оставшихся дефектов по методам оценивания вероятности ожидаемого числа скрытых дефектов и по статистическому моделированию практически не изменяется. При этом вероятности не проявления дефектов повышаются и становятся соизмеримы с оценкой ВБР ТС, поэтому меньше снижают эту оценку. Следует отметить, что оценки ожидаемого числа оставшихся дефектов приведены в табл. 1 при предположении, что начальное число дефектов может быть $R = 5$. При ограниченном числе возможных дефектов (при $R_M < 5$) число оставшихся дефектов будет меньше. По результатам проведенных исследований следует ожидать, что после достаточного числа испытаний ТС может остаться примерно один невыявленный дефект.

МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ ДИНАМИКИ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ОТРАБОТКИ

Из проведенных исследований получается, что оценки показателей модели динамики (роста) ВБР ТС (1), а также их точность тем выше, чем больше проведено испытаний и чем меньше случайных отказов при испытаниях. Подставляя полученные оценки параметров по зависимостям (15)–(20) в модель (1) по методу линеаризации, получим следующие зависимости для оценки динамики ВБР ТС в процессе отработочных испытаний и ее СКО с учетом выявляемых и возможных невыявленных (скрытых) дефектов:

$$\bar{P}_{\Sigma}(i) = \bar{P}_C \cdot \left[\prod_{q=1}^{Q_B} \bar{P}_q(i) \right] \cdot \bar{P}_r^{R_K}, i = 1, \dots, n; \quad (35)$$

$$\sigma_{\bar{P}_{\Sigma}(i)}^2 = [\bar{P}_{\Sigma}(i)]^2 \left(\frac{\sigma_{\bar{P}_C}^2}{\bar{P}_C^2} + \sum_{q=1}^{Q_B} \frac{\sigma_{\bar{P}_q(i)}^2}{[\bar{P}_q(i)]^2} + R_K \frac{\sigma_{\bar{P}_r}^2}{\bar{P}_r^2} \right), i = 1, \dots, n. \quad (36)$$

По окончании отработки наибольший интерес представляет значение оценки, достигнутой ВБР ТС, полученной в конце испытаний. Такую оценку можно определить по полученным

зависимостям для оценок ВБР ТС и ее СКО (35) и (36) при $i = n$. При этом оценка существенно зависит от числа возможных оставшихся дефектов R_K , вероятности которых снижаются при увеличении R_K . Поэтому оценку достигнутой ВБР ТС целесообразно определять с учетом ожидаемого числа дефектов (25). В этом случае точечная оценка достигнутой ВБР ТС в конце испытаний и ее СКО вычисляются в соответствии с методом линеаризации по зависимостям:

$$\bar{P}_\Sigma(n) = \bar{P}_C \cdot \bar{P}_r^{\bar{M}[R_K]}; \quad (37)$$

$$\sigma_{\bar{P}_\Sigma(n)}^2 = (\bar{P}_r^{\bar{M}[R_K]})^2 \cdot \sigma_{\bar{P}_C}^2 + \bar{P}_C^2 \{ \bar{M}[R_0] \cdot \bar{P}_r^{1-\bar{M}[R_K]} \}^2 \sigma_{\bar{P}_r}^2. \quad (38)$$

Если получены оценка ВБР ТС в конце отработочных испытаний и ее дисперсия, которую обозначим в виде $P(n)$ и $D(n)$, то для интервального оценивания ВБР необходимо построить ПВ возможных оценок ВБР p . Данная плотность вероятности достаточно хорошо аппроксимируется бета-распределением [3], что подтверждается на основе статистического моделирования

$$f(p) = [B(\alpha, \beta)]^{-1} p^{\alpha-1} (1-p)^{\beta-1}, \quad (39)$$

где $B(\alpha, \beta)$ – бета-функция;

α, β – параметры распределения.

Параметры бета-распределения можно определить на основе оценок параметров P и D по методу моментов:

$$\beta = \frac{P(1-P)^2}{D} - 1 + P; \quad \alpha = \frac{\beta P}{1-P}. \quad (40)$$

На основе ПВ (39) можно определить нижнюю доверительную границу P_H для ВБР ТС при заданной доверительной вероятности γ на основе равенства

$$\int_{P_H}^1 f(p) dp = \gamma. \quad (41)$$

Оценки ВБР ТС, определяемые по результатам испытаний в соответствии с зависимостями (37), (38) и (41), сравниваются с требуемыми показателями безотказности ТС, и исходя из этого обосновывается решение о возможности принятия ТС в эксплуатацию.

ДЕМОНСТРАЦИЯ МЕТОДА ОЦЕНИВАНИЯ ВЕРОЯТНОСТЕЙ НЕВЫЯВЛЕННЫХ ДЕФЕКТОВ

Для демонстрации работоспособности и точности изложенного способа оценивания переменной ВБР ТС по результатам отработочных испытаний как с учетом выявленных, так и возможных невыявленных (скрытых) дефектов рассмотрим следующий **пример**.

Проведено $n = 18$ испытаний ТС, при которых были зафиксированы отказы в 3-м и 8-м испытаниях. При этом с высокой вероятностью было установлено, что причинами отказов являлись дефекты, которые были устранены на основе доработок. Случайных (зачетных) отказов ТС при отработочных испытаниях зафиксировано не было ($m = 0$). Требуется получить реализацию оценки динамики ВБР ТС в процессе отработки и значение достигнутого уровня ВБР ТС в конце испытаний при доверительной вероятности $\gamma = 0,90$ без учета и с учетом возможных невыявленных дефектов.

Для решения задачи найдем реализации оценок ВБР ТС и показателей выявленных и возможных оставшихся дефектов, а также их СКО по зависимостям (15)–(20):

$$\hat{P}_C = \frac{18+1-0}{18+2} = 0,95; \quad \sigma_{\hat{P}_C} = \sqrt{\frac{(18+1)}{(18+2)^2(18+3)}} = 0,048; \quad (42)$$

$$\hat{P}_{q1} = \frac{3}{3+2} = 0,6; \quad \sigma_{\hat{P}_{q1}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 3}{(3+2)^2(3+3)}} = 0,2; \quad (43)$$

$$\hat{P}_{q2} = \frac{8}{8+2} = 0,8; \quad \sigma_{\hat{P}_{q2}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 8}{(8+2)^2(8+3)}} = 0,12; \quad (44)$$

$$\hat{P}_r = \frac{18+1}{18+2} = 0,95; \quad \sigma_{\hat{P}_r} = \sqrt{\frac{18+1}{(18+2)^2(18+3)}} = 0,048, \quad r = 0, 1, \dots, R_M. \quad (45)$$

По зависимостям (25) и (29) вычисляем оценки вероятностей ожидаемого числа возможных невыявленных (скрытых) дефектов. По данным табл. 1 примем реализацию оценки ожидаемого числа невыявленных дефектов как $\hat{M}[R] = 1$. При этом значении с учетом полученных оценок (42)–(45) реализация оценки ВБР ТС вычисляется по зависимости (35). Реализации оценок динамики ВБР ТС в процессе испытаний с учетом и без учета возможных невыявленных дефектов показаны на рис. 4, из анализа которого следует, что оценка ВБР ТС при учете невыявленных (скрытых) дефектов заметно ниже по сравнению с оценкой ВБР без учета таких дефектов.

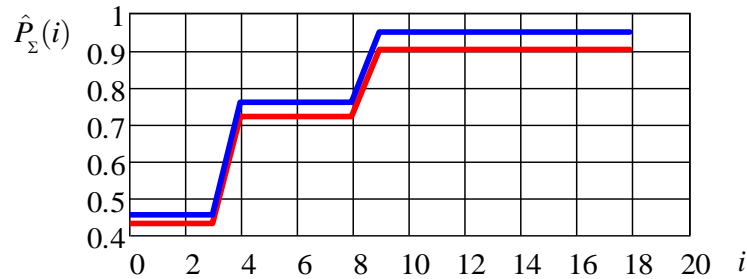


Рис. 4. Значения реализации возможных оценок роста ВБР ТС в процессе i -х испытаний: без учета невыявленных дефектов (синяя) и с учетом невыявленных дефектов (красная)

Значение оценок ВБР ТС в конце испытаний и ее СКО определяются по зависимостям (37) и (38). Реализации оценки ожидаемого достигнутого значения ВБР ТС и ее СКО определяются по зависимостям:

– без учета невыявленных дефектов (при $\bar{M}[R_K] = 0$)

$$\hat{P}_z(n) = \hat{P}_C; \quad \sigma_{\hat{P}_z(n)}^2 = \sigma_{\hat{P}_C}^2; \quad (46)$$

– с учетом невыявленных дефектов (при $\bar{M}[R] = 1$)

$$\hat{P}_z(n) = \hat{P}_C \cdot \hat{P}_r; \quad \sigma_{\hat{P}_z(n)}^2 = \hat{P}_r^2 \sigma_{\hat{P}_C}^2 + \hat{P}_C^2 \sigma_{\hat{P}_r}^2. \quad (47)$$

По указанным выше зависимостям получаются реализации оценок достигнутой ВБР ТС и их СКО: по (46) $\hat{P}_z(18) = 0,95$; $\sigma_{\hat{P}_z(18)} = 0,048$; по (47) $\hat{P}_z(18) = 0,903$; $\sigma_{\hat{P}_z(18)} = 0,064$.

Для определения интервальных оценок ВБР ТС необходимо построить ПВ этих оценок. Плотность вероятности оценок ВБР без учета дефектов строится по зависимости (12), она показана на рис. 5 в уменьшенном масштабе. При этом ПВ оценок ВБР ТС с учетом одного невыявленного (скрытого) дефекта можно построить в классе бета-распределения на основе зависимости (39) при значениях (37), (38) и (40), которые показаны на рис. 5. На этом же рисунке представлена гистограмма распределения возможных оценок ВБР ТС, которые получены по методу статистического моделирования по 10000 серий «испытаний». Данные рис. 5 подтверждают достоверность бета-распределения оценок.

На основе построенных ПВ численным методом по зависимости (41) определяется оценка нижней доверительной границы P_H для ВБР ТС при заданной доверительной вероятности

$\gamma = 0,90$: без учета оставшегося дефекта $\hat{P}_{\text{CH}}(18) = 0,886$ и с учетом возможного оставшегося дефекта $\hat{P}_{\text{CH}}(18) = 0,815$. При учете невыявленного дефекта гарантированное значение для ВБР ТС может существенно снизиться.

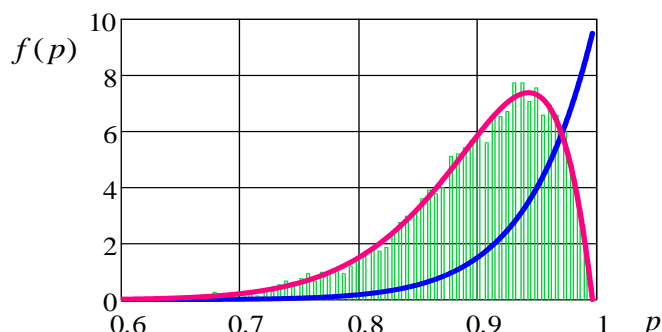


Рис. 5. ПВ возможных значений оценок ВБР ТС в конце отработки: без учета (синяя) и с учетом оставшегося дефекта (красная). Гистограмма ПВ оценок ВБР ТС (зеленая)

Полученные результаты подтверждают, что если не учитывать возможные невыявленные дефекты, то оценка гарантированного значения ВБР ТС существенно смещается в большую сторону, а ее СКО уменьшается. Это может привести к повышению риска заказчика. В частности, при требуемой ВБР $P_{\text{ТР}} = 0,95$ в условиях рассмотренного примера при принятии ТС в эксплуатацию вероятность, что останется невыявленным хотя бы один дефект равна 0,40. Соответственно, если при этом не учитывать возможные оставшиеся дефекты, то риск заказчика, что ВБР соответствует требуемой, составит $\beta = 0,40$, которым не следует пренебрегать.

Приведенный пример подтверждает работоспособность и точность изложенного метода статистического оценивания роста ВБР ТС по результатам отработочных испытаний при учете как выявленных, так и возможных невыявленных (скрытых) дефектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований получены следующие основные результаты.

1. Представлена математическая модель изменения вероятности безотказной работы ТС в процессе испытаний с учетом возможных дефектов.

2. Представлены зависимости для оценок неизвестных параметров математической модели динамики ВБР ТС (1) по результатам отработочных испытаний по методу несмещенных оценок.

3. Разработаны методы оценивания вероятностей ожидаемого числа возможных невыявленных (скрытых) при испытаниях дефектов ТС по МНО и на основе вероятностей не проявления дефектов при испытаниях. Полученные результаты подтверждены на основе статистического моделирования. Показано, что после испытаний ТС могут остаться невыявленными практически не более 2-3 дефектов.

4. С учетом полученных оценок параметров математического роста ВБР технических систем (1) обоснован метод оценивания ВБР ТС в процессе испытаний и достигнутого уровня ВБР ТС после цикла испытаний с учетом выявленных и возможных невыявленных дефектов.

5. Проведена демонстрация разработанного метода, и подтверждены его работоспособность и точность при оценивании ВБР ТС с учетом возможных дефектов. Показано, что если не учитывать возможные невыявленные дефекты, то возрастает риск, что при принятии ТС в эксплуатацию ее безотказность не будет соответствовать предъявляемым требованиям.

Разработанный метод оценивания безотказности ТС однократного использования может применяться для повышения точности оценивания и достоверности контроля безотказности ТС по результатам отработочных испытаний.

Список используемых источников

1. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика: Основы моделирования и первичная обработка данных: [справочное издание]. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 471 с.
2. Борейко Д.А., Быков И.Ю., Смирнов А.Л. Чувствительность метода акустической эмиссии при обнаружении дефектов в трубных изделиях // РАН. Дефектоскопия. – 2015. – № 8. – С. 24–33.
3. Вероятность и математическая статистика: энциклопедия / под ред. Ю.В. Прохорова. – М.: Большая Российская энциклопедия, 2003. – 982 с.
4. Волков Л.И., Рудаков В.Б. Статистический контроль иерархических систем. – М.: Изд-во СИП РИА, 2002. – 360 с.
5. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности / под ред. Б.В. Гнеденко. – М., 2017 – 382 с.
6. Лукин В.Л., Сухорученков Б.И. Концепция безотказности технических систем длительного функционирования //Двойные технологии. – 2014. – № 1 (66). – С. 2–7.
7. Надежность ракетных двигателей на твердом топливе: моногр. / Ю.М. Милехин [и др.]. – М.: МГУП, 2005. – 878 с.
8. Прохоров Ю.В., Розанов Ю.А. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1967. – 495 с.
9. Савчук В.П. Байесовские методы статистического оценивания: Надежность технических объектов. – М.: Наука, 1989. – 323 с.
10. Сухорученков Б.И., Огороков М.В. Оценки показателей возможных дефектов технических систем, не выявляемых после отработочных испытаний //Двойные технологии. – 2014. – № 1 (66). – С. 12–18.
11. Сухорученков Б.И. Анализ малой выборки. Прикладные статистические методы. – М.: Вузовская книга, 2010. – 380 с.
12. Труханов В.М. Надежность в технике. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский дом «Спектр», 2017. – 656 с.
13. Труханов В.М., Матвеев А.М. Надежность сложных систем на всех этапах жизненного цикла: моногр. / под ред. В.М. Труханова. – М.: Издательский дом «Спектр», 2012. – 663 с.
14. Чертищев В.Ю. Оценка вероятности обнаружения дефектов акустическими методами в зависимости от их размера в конструкциях из ПКМ для выходных данных контроля в виде бинарных величин //Авиационные материалы и технологии. – 2018. – № 3 (52). – С. 65–79.

С.Н. Буяков,
кандидат технических наук;
А.М. Дзитоев,
кандидат технических наук;
М.С. Дзитоев,
кандидат технических наук, доцент;
А.В. Молостов

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОТРАНСФОРМАТОРОВ В СИСТЕМАХ ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Представлены принципиальная схема термотрансформатора и термодинамические циклы, которые в нем реализуются. Показана зависимость коэффициента трансформации теплоты от холодильного коэффициента холодильной машины и термического коэффициента полезного действия теплового двигателя. Приведены результаты эксергетического анализа термотрансформаторов применительно к тепловым насосам. Выявлена область, в которой применение термотрансформаторов, работающих в режиме теплового насоса, наиболее целесообразна.

Ключевые слова: термотрансформатор, тепловой насос, источник теплоты, источник холода, система термостатирования.

ВВЕДЕНИЕ

Системы термостатирования (СТ) объектов ракетно-космических комплексов (РКК) являются крайне энергоемкими. В их составе применяются электрические и химические источники теплоты мощностью от 200 кВт и более. Поэтому повышение энергоэффективности СТ является актуальной задачей, решение которой позволит повысить энергоэффективность всего РКК. Одним из путей повышения энергоэффективности СТ является применение в их составе термотрансформаторов, работающих в режиме теплового насоса.

Известно, что между тепловыми и электрическими явлениями много общего. Это в полной мере относится и к преобразователям энергии – трансформаторам [1, 2]. По аналогии с электротрансформаторами напряжения можно говорить о трансформаторах теплоты – термотрансформаторах.

Термотрансформатором называют устройство для увеличения или уменьшения температуры первичного источника теплоты (в данном случае температура выступает как аналог напряжения).

Таким образом, назначение термотрансформатора состоит в том, чтобы преобразовать теплоту q_1 с потенциалом T_1 в теплоту q_2 с потенциалом T_2 .

Если $T_1 > T_2$ то термотрансформатор называют понижающим, если $T_1 < T_2$ – повышающим.

СХЕМА ПОНИЖАЮЩЕГО ТЕРМОТРАНСФОРМАТОРА

Принципиальная схема понижающего трансформатора и циклы, которые реализуются в нем, представлены на рис. 1.

В состав термотрансформатора входит энергоустановка А, в которой реализуется обратимый прямой цикл Карно (1-2-3-4-1). Работа, получаемая в цикле l , используется для привода холодильной машины Б, которая работает по обратному циклу Карно (1'-2'-3'-4'-1').

Теплота, которая подводится к рабочему телу прямого цикла, определяется выражением

$$q_1 = T_1(S_b - S_a). \quad (1)$$

Тогда теплота, которая отводится от рабочего тела цикла,

$$q_2' = T_2(S_b - S_a). \quad (2)$$

В соответствии с первым законом термодинамики работа цикла

$$l = q_1 - q_2'. \quad (3)$$

Эта работа используется для привода холодильной машины, т. е. для реализации обратного цикла Карно.

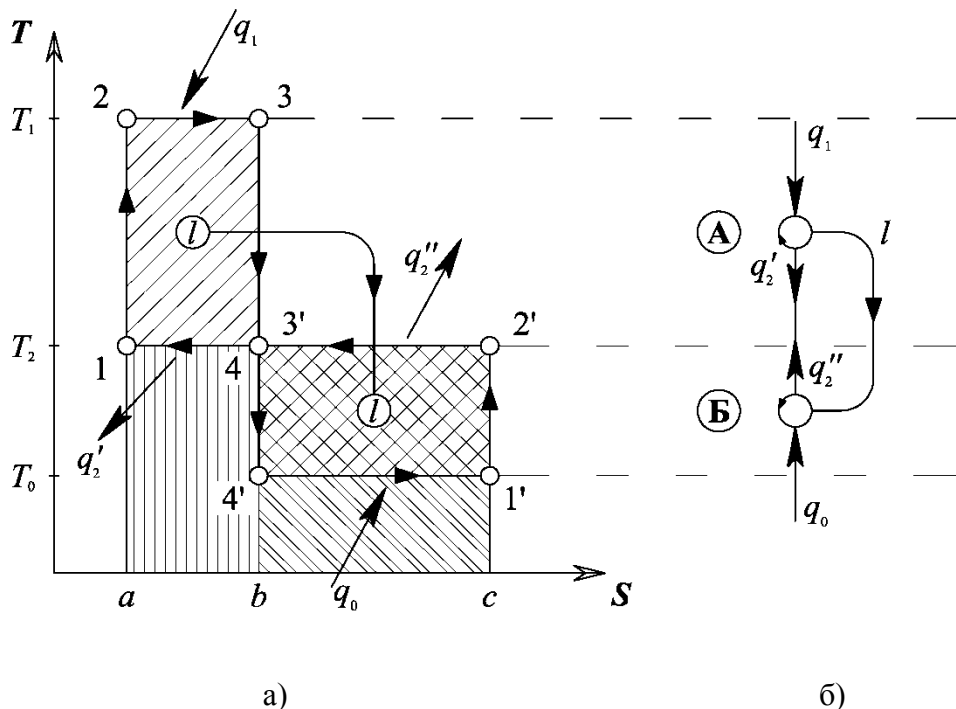


Рис. 1. Принципиальная схема термотрансформатора и циклы, реализуемые в нем: а – термодинамические циклы; б – принципиальная схема

В соответствии с рис. 1 работа цикла l будет иметь вид

$$l = q_2'' - q_0. \quad (4)$$

Здесь q_2'' – тепловой поток, отводимый в обратном цикле на уровень температуры T_2 , представленный выражением

$$q_2'' = T_2(S_b - S_c), \quad (5)$$

а q_0 – тепловой поток, подводимый к рабочему телу обратного цикла от низкопотенциального источника теплоты с температурой T_0 , который вычисляется по формуле

$$q_0 = T_0(S_c - S_b). \quad (6)$$

Таким образом, в термотрансформаторе на уровень температуры T_2 передается общее количество теплоты q_2 , которое вычисляется по формуле

$$q_2 = q_2'' + q_2'. \quad (7)$$

С учетом вышеприведенных соотношений получаем следующие выражения для q_2'' и q_2' :

$$q_2'' = q_0 + l; \quad q_2' = q_1 - l, \quad (8)$$

тогда q_2 будет представлено соотношением

$$q_2 = q_1 + q_0 > q_1. \quad (9)$$

То есть на температурный уровень T_2 отводится теплоты больше, чем подводится при температуре T_1 .

Отношение q_2 к q_1 называют *коэффициентом трансформации теплоты* и обозначают буквой ψ . Он определяется формулами:

$$\psi = \frac{q_2}{q_1} = \frac{q_1 + q_0}{q_1} = 1 + \frac{q_0}{q_1} = 1 + \frac{T_0(S_c - S_b)}{T_1(S_b - S_a)} = 1 + \frac{T_0(T_1 - T_2)}{T_1(T_2 - T_0)}; \quad (10)$$

$$\psi = 1 + \frac{q_0}{q_1} = 1 + \frac{q_0}{l} \frac{l}{q_1} = 1 + \varepsilon \eta_t; \quad \varepsilon = \frac{q_0}{l}; \quad \eta_t = \frac{l}{q_1}, \quad (11)$$

где ε – холодильный коэффициент обратного цикла;

η_t – термический КПД прямого цикла.

Уравнение (10) можно преобразовать к виду

$$\psi = 1 + \frac{T_0(T_1 - T_2)}{T_1(T_2 - T_0)} = \frac{T_2(T_1 - T_0)}{T_1(T_2 - T_0)}. \quad (12)$$

Коэффициент трансформации зависит от уровня температур T_1 , T_2 , T_0 , а более конкретно – от холодильного коэффициента холодильной машины ε и термического КПД теплового двигателя η_t .

Коэффициент ψ показывает, какое количество теплоты при температуре T_2 в джоулях можно получить из одного джоуля теплоты при температуре T_1 .

Следует подчеркнуть, что работоспособность (эксергия) теплоты q_1 и работоспособность теплоты q_2 одинаковы в случае отсутствия потерь.

В понижающем термотрансформаторе $\psi > 1$, $q_2 > q_1$. К системе подводится теплота из окружающей среды, равная разности удельных тепловых потоков $q_2 - q_1$.

Анализ формулы (12) показывает, что при стремлении $T_1 \rightarrow \infty$

$$\psi_\infty = \frac{T_2}{T_2 - T_0} > 0; \quad q_2 > q_1, \quad (13)$$

при $T_0 \rightarrow 0$, $\psi_0 = 1$, т. е. $q_2 = q_1$.

Если в термотрансформаторе заменить энергоустановку А (в которой реализуется прямой цикл) работой l , необходимой для привода холодильной машины Б (тепловой насос), которая переводит теплоту q_0 из окружающей среды на более высокий температурный уровень T_2 , то холодильную машину называют тепловым насосом [3–5].

В тепловом насосе (как термотрансформаторе) прямой цикл Карно заменен идеальной тепловой машиной с термическим КПД $\eta_t = 1$, т. е. весь тепловой поток q_1 может быть преобразован в работу полностью. Это возможно при стремлении температуры $T_1 \rightarrow \infty$. Действительно, эксергия теплового потока q_1 в этом случае

$$e_{q_1} = q_1 \frac{T_1 - T_{oc}}{T_1}, \quad (14)$$

при $T_1 \rightarrow \infty$

$$e_{q_1} = q_1 = l, \quad (15)$$

т. е. в тепловом насосе, как термотрансформаторе, прямой цикл заменен идеальной тепловой машиной с КПД $\eta_t = 1$.

Эксергетический КПД любого термотрансформатора всегда меньше 1 из-за потерь эксергии в реальных циклах, т. е.

$$e_{q_1} > e_{q_2}; \quad \eta_e = \frac{e_{q_2}}{e_{q_1}} < 1. \quad (16)$$

Эффективность работы теплового насоса φ оценивается отношением, которое называют коэффициентом преобразования [6]:

$$\varphi = \frac{q_2''}{l}. \quad (17)$$

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что коэффициент φ имеет тот же смысл, что и коэффициент ψ .

Различие состоит в том, что коэффициент ψ показывает, скольким единицам теплоты при температуре T_2 соответствует единица теплоты при температуре T_1 , тогда как коэффициент φ показывает максимальное количество теплоты в джоулях, которое можно получить при температуре T_2 , затратив l джоулей работы.

Тепловой насос – это термотрансформатор, у которого температура T_1 стремится к бесконечности, т. е.

$$\varphi = \psi_{\infty} = \frac{T_2}{T_2 - T_0}. \quad (18)$$

Из формулы (18) получаем количество теплоты на единицу затраченной работы.

Термотрансформаторы широко используются для систем центрального отопления, в системах термостатирования объектов РКК, а также в системах, где можно заменить химические и электрические источники теплоты на тепловые насосы.

В системах термостатирования термотрансформаторы используются в режимах нагрева и охлаждения. Это обусловлено тем, что при минимальных затратах энергии можно получить необходимое количество кондиционного теплового потока.

ВЫВОД

Из вышеизложенного следует, что применение термотрансформаторов, работающих в режиме теплового насоса, в системах термостатирования объектов ракетно-космических комплексов целесообразно и более выгодно, чем непосредственное применение электрических и химических источников теплоты.

Список используемых источников

1. Сахин В.В., Герлиман Е.М., Брыков Н.А. Термодинамические принципы трансформации теплоты // Системный анализ и аналитика. – 2019. – № 1 (9). – С. 101–109.
2. Дзино А.А., Малинина О.С. Принципы трансформации теплоты в низкопотенциальной энергетике // Вестник Международной академии холода. – 2019. – № 1. – С. 29–33.
3. Амерханов Р.А., Кириченко А.С., Снисаренко В.П. Использование воздушного теплового насоса для теплоснабжения объектов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2015. – № 1 (182). – С. 73–79.
4. Тепловой насос как элемент энергосберегающей политики для энергоёмких предприятий текстильной и лёгкой промышленности / С.В. Федосов [и др.] // Текстильная и легкая промышленность. – 2018. – № 2. – С. 10–12.
5. Характеристики теплонасосного режима гибридного термотрансформатора с использованием естественных источников теплоты / В.М. Арсеньев [и др.] // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2012. – № 9 (103). – С. 9–23.
6. Амерханов Р.А., Кириченко А.С. Обоснование параметров комбинированной системы солнечного тепло- и холодоснабжения зданий // Сантехника. Отопление. Кондиционирование. – 2015. – № 9 (165). – С. 62–65.

М.В. Ведерников*,

кандидат технических наук, доцент;

А.В. Ильинский**,

кандидат технических наук;

Л.А. Сырцов*,

кандидат технических наук, доцент

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

**Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург.

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ СТРУЙ ПО КРИВОЛИНЕЙНОЙ ПОВЕРХНОСТИ РАДИОПРОЗРАЧНОГО КУПОЛА

Предложена методика исследования физической картины распространения в неподвижной газовой среде одиночной газовой струи при переходе ее движения из нестеснённого состояния в движение относительно вогнутой криволинейной поверхности. Описана физическая картина движения струи относительно сферической поверхности при различных схемах формирования потока.

Ключевые слова: струя, сферическая поверхность, угловые границы струи, сопла.

ВВЕДЕНИЕ

Как показали расчеты, выполненные по математической модели теплообмена на поверхности радиопрозрачного купола (РПК), для отведения пикового количества тепла от купола необходимо осуществлять внутренний обдув купола воздухом со скоростью около 5 м/с. Однако принятое в математической модели в (качестве допущения) постоянство скорости обдува внутренней поверхности купола невозможно реализовать на практике. В связи с этим актуальным является экспериментальное изучение характера движения охлаждающего воздуха относительно сферической оболочки купола.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Наиболее теплонапряженный участок находится на южной стороне купола. Его центральная точка имеет на куполе широтную угловую координату (выше экватора сферы)

$$\psi = 90^{\circ} - (\varphi - 23^{\circ}27'),$$

где φ – географическая широта места расположения объекта;

$23^{\circ}27'$ – значение угла наклона эклиптики к небесному экватору.

В этой точке РПК в день летнего солнцестояния, в момент астрономического полдня, будет происходить наиболее интенсивный нагрев оболочки за счет солнечной радиации. Кроме солнечной радиации на тепловое состояние РПК будет влиять температура окружающего воздуха, а также - поглощенная мощность от СВЧ-излучения. Толщина материала оболочки на пути прохождения СВЧ-излучения возрастает для излучения, исходящего с периферийных участков фазированной решетки. Соответственно на этих участках РПК возрастает и количество выделяющегося тепла при его поглощении в материале сферы. Таким образом, для РПК работающей радиолокационной станции, находящейся в средних широтах, наибольший нагрев материала оболочки возможен в экваториальной части сферы РПК в широтном диапазоне (ψ) от 0° до $+45^{\circ}$ относительно ее экватора.

Исходя из конструктивных особенностей купола, подача охлаждающего воздуха должна осуществляться с уровня цилиндрического основания РПК. При этом для поступления охла-

ждающего воздуха в пространство выше плоскости антенны поток на значительной части своего пути должен двигаться вдоль сферической поверхности купола, и здесь движение воздуха будет стесненным. Характер движения воздуха обусловлен в первую очередь двоякой кривизной сферы, которая в каждой точке поворачивает поток в меридиональной плоскости по нормали к текущему вектору скорости и препятствует свободному расширению потока в широтном направлении. Ввиду большой сложности теоретического описания такого движения было проведено экспериментальное исследование на физической модели - гладкой сфере диаметром 1,3 м, что соответствует масштабу 1:10÷1:15 для существующих РПК.

При разработке физической модели делались следующие допущения.

1. Внутренняя поверхность сферы РПК – гладкая.
2. Торможение струи по мере её движения вызвано взаимодействием с неподвижным воздухом и не обусловлено действием поверхности.
3. Поток изотермичен.
4. Закон изменения скорости потока на срезе сопла – равномерный.

При указанных допущениях возможно для создания скоростных и геометрических критериев подобия в качестве базового явления рассматривать затопленное истечение одиночной компактной струи при её нестеснённом движении. Как показано в работах [1, 2], для такого истечения изменение скорости потока на оси струи является линейной функцией от расстояния и корня квадратного от площади сечения сопла.

ЦЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЯ И ТРЕБОВАНИЯ К ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Основными целями исследования являлись:

- изучение физической картины движения струи воздуха внутри сферической оболочки при разных условиях её выхода из сопла;
- определение проектных напорных (скоростных) характеристик для потока воздуха на выходе из сопла.

Для обеспечения модельности должны быть выполнены следующие условия и критерии подобия.

Условия:

1. Модельный газ – воздух, характер движения струи турбулентный: $Re > 2300$.
2. Температуры воздуха струи и неподвижного воздуха внутри модели РПК равны.

Критерии подобия:

Геометрические критерии

для оболочки РПК $\frac{R_{сф}^{об}}{R_{сф}^{мод}} = \bar{R}_{сф}$

для сопел:

$\frac{r_{сопл}^{об}}{r_{сопл}^{мод}} = \bar{r}_{сопл}$ – для круглого сопла;

$\frac{a_{сопл}^{об}}{a_{сопл}^{мод}} = \bar{a}_{сопл}$ и $\frac{b_{сопл}^{об}}{b_{сопл}^{мод}} = \bar{b}_{сопл}$ – для сторон прямоугольного сопла.

Скоростные критерии

для потока на срезе сопла $\frac{V_0^{об}}{V_0^{мод}} = \bar{V}_0$;

для дальнобойности струи $L_{стр}$

$\frac{L_{стр}^{об}}{R_{сф}^{об}} = \frac{L_{стр}^{мод}}{R_{сф}^{мод}} = \bar{L}_{стр}$.

Под дальнобойностью струи согласно принятым нормам понимается расстояние x , на котором на оси затопленной нестесненной струи ее скорость равна 0,2 м/с.

В дальнейшем, при переносе результатов моделирования на объект, в первом приближении принималось равенство численных значений для первых пяти критериев подобия.

Индексами об. и мод. обозначены объект и модель соответственно. Индексы сф., сопл., стр. и 0 соответствуют сфере, соплу и струе. Индекс 0 – срезу сопла.

Как отмечалось выше, в методическом отношении базовой является методика описания процесса нестесненного движения затопленной струи [1, 2]. Закономерности такого движения воздуха описывает теория турбулентных струйных течений, в которой используются эмпирические коэффициенты. При этом перенос газов и конвективного тепла в помещениях осуществляется воздушными струями.

В результате взаимодействия приточных струй и циркуляционных потоков воздуха помещения, вовлекаемого в движение этими струями, формируются поля скорости. Под приточной струей понимают поток воздуха, образованный принудительным истечением воздуха из отверстия воздухораспределителя (сопла).

В данном исследовании рассматриваются сосредоточенные струи, образующиеся при истечении из сопла круглой или прямоугольной формы (в последнем случае с соотношением сторон сопла не более 5:1).

На реальном РПК (объекте) и на модели подача воздуха предполагается с уровня опирания сферы РПК на цилиндрическое основание. Струя выходит в меридиональной плоскости РПК по направлению к зазору между контуром антенны и сферы. При этом рассматривается два варианта подачи воздуха:

- тангенциальная (по касательной к сфере) подача воздуха непосредственно от сопла;
- подача воздуха по кратчайшему пути к зазору между антенной (в её горизонтальном положении) и сферой.

При подаче воздуха по кратчайшему пути на отрезке от сопла до начала входа в середину зазора между антенной и куполом (на уровне нижней плоскости антенны при её горизонтальном положении) струя считается нестесненной (свободной). При этом сразу после выхода из сопла происходят расширение струи и увеличение ее поперечного сечения $A_{стр.}$.

Далее струя воздуха вступает во взаимодействие с поверхностью сферы. В точке пересечения оси потока и сферы угол между осью потока и касательной к сфере составляет примерно $31-37^\circ$ (рис. 1,а). Затем воздух движется вверх вдоль сферы. При этом струя из компактной трансформируется в настилающую (полуограниченную).

На форму струи и на ее параметры оказывают влияние два основных взаимодействия: взаимодействие струи с неподвижным воздухом и взаимодействие со сферой.

Для нестесненного движения скорость струи на оси потока на расстоянии x от сопла подчиняется формуле И.А. Шепелева [2]:

$$v_x = \frac{mv_0\sqrt{A_0}}{x}; \quad (1)$$

где v_0 – скорость выпуска воздуха или скорость на оси начального участка струи, м/с;

v_x – скорость воздуха на оси основного участка струи на расстоянии x , м/с;

A_0 – площадь сечения приточного отверстия, м²;

x – расстояние по оси струи от места выпуска до рассматриваемого сечения, м,

m – аэродинамическая характеристика приточной струи.

Для компактной струи $m = \frac{\Theta\varphi}{c\sqrt{\pi}}$

$$\varphi = \left[\int_0^1 \left(\frac{v}{v_0} \right)^2 d \left(\frac{A}{A_0} \right) \right]^{0.5}.$$

Здесь Θ – коэффициент, учитывающий изменение плотности воздуха в зависимости от температуры,

$$\Theta = \sqrt{\frac{273 + t_B}{273 + t_0}},$$

- где t_0 – температура приточной струи в начальном сечении, °С;
 t_B – температура окружающего воздуха на удалении от струи, °С;
 Φ – экспериментально определяемый коэффициент, учитывающий неравномерность распределения скорости движения воздуха по площади приточного отверстия A .

Для принятых допущений коэффициент $\Theta = 1,0$.

В зоне турбулентного перемешивания струй независимо от их типа принят экспоненциальный закон распределения скорости (и температуры) (формула Г. Рейхардта) [2] (рис. 1,б):

$$v_{x,y} = v_x e^{-0,5(y/cx)^2}; \quad (2)$$

$$\Delta t_{x,y} = \Delta t_x e^{-0,5\sigma(y/cx)^2}, \quad (3)$$

- где $v_{x,y}$ – скорость движения воздуха в произвольной точке струи, заданной координатами x, y , м/с;
 v_x – скорость движения воздуха в центре произвольного поперечного сечения струи на расстоянии x , м/с;
 $\Delta t_{x,y}$ – избыточная температура в произвольной точке струи, заданной координатами x, y , °С;
 Δt_x – избыточная температура в центре произвольного поперечного сечения струи на расстоянии x , °С;
 x, y – координаты точки, м;
 c – экспериментальная постоянная, среднее значение которой равно 0,082;
 σ – экспериментальная постоянная, среднее значение которой равно 0,8.

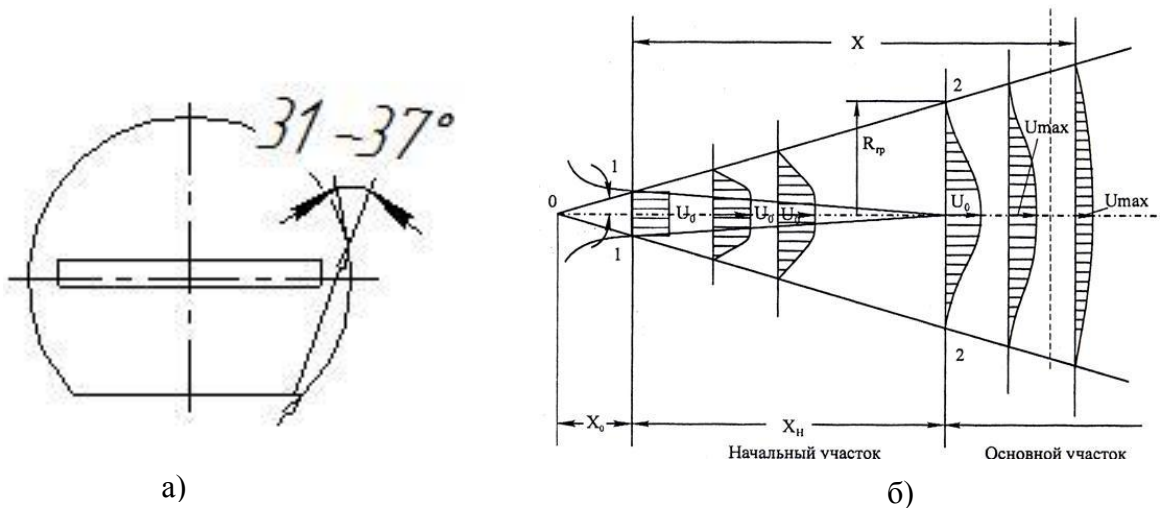


Рис. 1. Варианты подачи воздуха (а) и распределение скорости (б) в зоне турбулентного перемешивания струй [2]

Предварительная (грубая) оценка требуемых параметров потока на объекте. Для получения оценочных параметров потока воздуха в наиболее теплонапряженной точке был проведён предварительный расчет с использованием достаточно грубого допущения о нестеснённом характере движения воздуха вдоль внутренней поверхности сферы. Следует отметить: рассматривался идеальный случай – температура потока равна температуре воздуха под ПРК, распределение скорости потока воздуха по сечению сопла равномерно (т. е. $\Phi = \Theta = 1,0$).

При таких допущениях скорость обдува в 5,22 м/с, близкая к требуемой в наиболее теплонапряженной точке с учетом движения воздуха по дуге $\psi = 0 \div 45^\circ$, была бы достигнута для круглого сопла диаметром 0,3 м при скорости на выходе из сопла $v_0 = 20$ м/с.

Такая струя может свободно пройти в зазор между торцом горизонтально расположенной антенны и сферой. Скорость на оси струи в этой точке составила бы 8,45 м/с. Скорость на оси потока в полюсе (при движении воздуха по дуге $\psi = 0 \div 90^\circ$) составила бы 3,5 м/с.

Однако реальное движение воздуха вдоль поверхности оболочки является стесненным

Конкретизация цели эксперимента. С точки зрения изучения физической картины движения одиночной струи воздуха внутри сферической оболочки целями экспериментального исследования являлись:

1. Определение линии максимальной скорости потока относительно поверхности сферы.

2. Определение зависимости $\frac{V_{\text{эксп}}^{\text{max}}(\psi)}{V_0} = f(\psi)$.

3. Определение угловых границ «растекания струи» на модели относительно меридиана выхода. В качестве граничной скорости струи принималась скорость, равная пороговой скорости для измерительного прибора $V^{\text{порог}} = 0,2$ м/с.

4. Определение угловой границы потока $\gamma^\circ(\psi)$ относительно оси потока (меридиана выхода), внутри которого скорость воздуха на реальном объекте не ниже 5 м/с.

5. Для широты $\psi = +45^\circ$ определение относительной ширины струи:

$$\frac{y_{\text{эксп}}^{\text{гр}}(45^\circ)}{y_{\text{расч}}^{\text{гр}}(45^\circ)},$$

где $y_{\text{эксп}}^{\text{гр}}(45^\circ)$ – длина половины дуги, измеренная по сфере, от оси струи до ее границы,

$$y_{\text{эксп}}^{\text{гр}}(45^\circ) = \frac{\gamma^\circ(45^\circ) \cdot 2\pi \times R_{\text{сф}} \cdot \cos(45^\circ)}{360^\circ},$$

$$y_{\text{расч}}^{\text{гр}}(45^\circ) = c \cdot L(45^\circ) \cdot \sqrt{-2 \cdot \ln \frac{V^{\text{порог}}}{V_{\text{расч}}^{\text{max}}(45^\circ)}}.$$

Здесь $c = 0,082$ – экспериментальная постоянная [2];

$L(45^\circ)$ – путь струи от сопла до параллели на широте $+45^\circ$;

$V^{\text{порог}}$ – пороговая для измерительного прибора скорость, она составляет 0,2 м/с;

$\gamma^\circ(45^\circ)$ – угловая граница «растекания струи» относительно меридиана выхода на широте $+45^\circ$.

6. Определение относительного поперечного размера на её оси $\frac{\delta_{\text{max}}(\psi)}{R_{\text{сф}}}$.

7. Определение соотношения экспериментально определённых скоростей на оси струи и расчетных – для случая, если бы данная струя текла в условиях нестесненного течения:

$$\frac{V_{\text{эксп}}^{\text{max}}(\psi)}{V_{\text{расч}}^{\text{max}}(\psi)} = f(\psi).$$

В последней формуле введены следующие обозначения:

ψ – широта точки замера на модели относительно экватора модели (экватора сферы)

$V_{\text{расч}}^{\text{max}}(\psi)$ – скорости на оси струи и расчетные для случая, если бы данная струя текла в нестесненных условиях нестесненного течения.

Длина дуги на поверхности сферы, соответствующая экспериментально установленным угловым границам потока γ° на широте ψ , определяется по формуле $\omega_{\psi}^{\text{гр}} = 2\gamma(\psi) \cdot R_{\text{сф}} \cdot \cos \psi$.

Замеры проводились в точках, соответствующих $\psi = -45^\circ, 0^\circ, +45^\circ, +90^\circ$ (или соответствующих координате x), где ψ – широта точки замера относительно экватора модели РПК.

В ходе эксперимента поток выпускался из точки, находящейся на линии пересечения цилиндрического основания и сферы. Выпуск воздуха производился в двух вариантах:

1. По касательной к внутренней поверхности сферы.
2. По кратчайшему направлению от точки выпуска к линии экватора на внутренней поверхности сферы.

С точки зрения определения проектных характеристик системы подачи воздуха на охлаждение купола (путем пересчета результатов эксперимента на реальный объект) целями эксперимента были:

1. Определение оптимального направления выпуска для заданной точки установки сопла.
2. Определение V_0 для заданной точки установки сопла и заданного направления выпуска, при которой скорость обдува в наиболее теплонапряженной точке составит 5 м/с.
3. Определение геометрии сопла.
4. Определение требуемого расхода воздуха и расходных характеристик вентилятора.

Этапы проведения эксперимента.

На первом этапе определялись параметры струи и соответственно сопла при ее нестесненном движении. Работы проводились для двух видов сопел.

1. Сопло цилиндрическое круглого сечения диаметром 35 мм.
2. Сопло прямоугольное 70 x 15 мм с углом полуоткрытия $\approx 30^\circ$.

Для таких сопел по соотношению расчетных дальностей и экспериментально определенных для нестесненного движения струи установлены следующие значения коэффициента ϕ : для первого (круглого) сопла $\phi \approx 0,5$, для второго (прямоугольного) сопла $\phi \approx 0,3$.

На втором этапе проводились эксперименты для одиночной струи, выпускаемой из указанных сопел либо по касательной, либо по кратчайшему пути по направлению к экватору.

Результаты экспериментального исследования.

В результате проведенных экспериментов установлена следующая физическая картина движения струи относительно сферической поверхности.

1. Взаимодействие струи с неподвижным воздухом приводит к расширению струи, а взаимодействие со сферой, вследствие ее кривизны в меридиональной плоскости, способствует значительному сжатию струи в этой плоскости и усиливает ее расширение по окружности.

2. Максимальная скорость потока в каждом поперечном сечении струи наблюдается в пристеночном слое. То есть по мере удаления от поверхности сферы скорость потока падает.

3. При движении воздуха вдоль гладкой поверхности сферы максимальная скорость потока по мере удаления от сопла снижается значительно меньше, чем при движении по кратчайшему пути. Например, для широты $\psi = +45^\circ$:

- на 130–160% – для круглого сопла при выпуске по касательной;
- на 150–230% – для круглого сопла при выпуске по кратчайшему пути;
- на 250–310% – для прямоугольного сопла при выпуске по касательной;
- на 290–300% – для прямоугольного сопла при выпуске по кратчайшему пути.

4. Угловые границы «растекания струи» относительно меридиана выхода (осевого меридиана струи) на широте $\psi = +45^\circ$ (в качестве граничной скорости струи принималась скорость, равная пороговой скорости для измерительного прибора $V^{\text{порог}} = 0,2$ м/с) составляют:

55–60° – в каждую сторону от меридиана выхода для круглого сопла при выпуске по касательной;

50–55° – в каждую сторону от меридиана выхода для круглого сопла при выпуске по кратчайшему пути;

60–65° – в каждую сторону от меридиана выхода для прямоугольного сопла при выпуске по касательной;

50–55° – в каждую сторону от меридиана выхода для прямоугольного сопла при выпуске по кратчайшему пути.

5. Ширина потока на сфере значительно больше ширины нестеснённой для одинакового пути. Так, для широты $\psi = +45^\circ$ относительная ширина (относительный поперечник) струи

$\frac{y_{\text{экс}}^{\text{гр}}(45^\circ)}{y_{\text{прасч}}^{\text{гр}}(45^\circ)}$ принимает значения:

3,2 – для круглого сопла при выпуске по касательной;

3,7 – для круглого сопла при выпуске по кратчайшему пути;

3,3 – для прямоугольного сопла при выпуске по касательной;

3,2 – для прямоугольного сопла при выпуске по кратчайшему пути.

6. При выпуске воздуха через несколько сопел с частичным наложением струй на широте $\psi = +45^\circ$ произойдет наложение струй. Для гарантированного охлаждения типового купола одной струей необходимо соотношение сторон сопла не более 5:1 при выпуске по касательной либо по кратчайшему пути.

ВЫВОД

В результате проведенных экспериментальных исследований описана физическая картина движения газовой струи относительно внутренней поверхности сферы, и выявлены основные закономерности распределения скорости потока вдоль струи по ее сечению.

Список используемых источников

1. *Абрамович Г.Н.* Прикладная газовая динамика. – М.: Наука, 1969. – 817 с.
2. *Белова Е.М.* Центральные системы кондиционирования воздуха в зданиях. – М.: Евроклимат, 2006. – 640 с.

В.О. Головчинский,
кандидат технических наук;
О.В. Мироненков,
кандидат химических наук

ВОПРОСЫ ОПТИМИЗАЦИИ СОСТАВА ПРИБОРНОЙ БАЗЫ МОБИЛЬНЫХ ЛАБОРАТОРИЙ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СТАРТОВЫХ КОМПЛЕКСОВ

Рассмотрены основные методические подходы к решению задачи по выбору наилучшей альтернативы из множества однотипных средств неразрушающего контроля для формирования приборной базы мобильных лабораторий стартовых комплексов ракетно-космических комплексов. Показано, что решением данной задачи может служить стратегия принятия решения в условиях определенности на основе оценки средневзвешенных показателей критериев привлекательности диагностического оборудования. Приведены основные критерии оценки качества однотипных средств неразрушающего контроля. Предложен к практическому использованию метод расчета весовых коэффициентов в многокритериальных оптимизационных задачах.

Ключевые слова: средства неразрушающего контроля, мобильная лаборатория, критерии оценки качества, весовые коэффициенты, ранжирование, множество Парето, оптимизация, альтернатива, экспертное решение.

Создание облика мобильной лаборатории неразрушающего контроля (НК) стартовых комплексов ракетно-космических комплексов (СК РКК) предполагает решение ряда оптимизационных задач. Одной из них является задача выбора из набора однотипных (с точки зрения технологического применения) образцов средств НК наиболее оптимальной модели данного вида диагностического оборудования в соответствии с принципом рационального использования заложенных в изделия потребительских характеристик и максимальной эффективности при их функционировании в составе мобильной лаборатории.

Пусть $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ – множество всех доступных для анализа в качестве альтернатив однотипных средств НК, представленных на рынке; $K = \{k_1, \dots, k_m\}$ – множество критериев оценки альтернативных вариантов. Тогда задачей оптимизации, в данном случае, является выбор из дискретного множества альтернатив наиболее выгодной в соответствии с критериями оценки этих альтернатив.

Определение множества критериев оценки (или просто критериев) является важным этапом при решении оптимизационной задачи и должно опираться на анализ технических показателей диагностического оборудования, а также на комплекс его потребительских свойств (в том числе и экономическую целесообразность). При этом критерии могут быть как количественными, которые можно выразить численными значениями, так и качественными, выраженными в категориальных терминах. В последнем случае, при построении математических моделей принятия решений, качественным критериям ставят в соответствие количественные характеристики.

Оценка однотипных образцов диагностического оборудования по качественным критериям основана на сравнении их технологических возможностей и, зачастую, носит субъективный характер в категориях «лучше/хуже». Например, программное обеспечение двух средств НК имеет сравнимые функциональные возможности, но различный интерфейс, а у третьего средства НК программное обеспечение отсутствует. Очевидно, что по критерию «программное обеспечение» первые два образца будут являться доминирующими над третьим. Между собой же первое и второе средство НК сильно конкурируют и определить, какое из них доминирующее, довольно сложно. В данном случае количественные показатели привлекательности альтернатив следует уравнивать. Если же приоритет сравниваемых критериев среди прочих достаточно высок, то тогда имеет смысл шкалировать их по-разному, даже при близ-

ком функционале. В ряде случаев распределение качественных критериев по n -мерной шкале довольно прозрачно. Так одной из основных технических характеристик приборов для измерения и анализа вибрации является «взрывозащищенное исполнение», которое выражается символьной маркировкой по ГОСТ Р 51330.0-99, например, 1Ex[ib]sПАТ4Х и 2ExnLПВТ6Х. При расшифровке данных маркировок становится понятным, что первый символ в приведенных обозначениях указывает на уровень взрывозащиты соответствующего прибора, поэтому критерий «взрывозащищенное исполнение» можно логично и просто оценить количественным значением.

Таким образом, качественные критерии определяют, главным образом, эксплуатационную технологичность диагностического оборудования (трудоемкость эксплуатации, унификацию, удобство обслуживания, универсальность применения и др.).

Критерии количественной оценки образцов диагностического оборудования разделяют на экономические, оперативные и технические показатели [1]. Экономические критерии отображают затраты на покупку и эксплуатацию оборудования. Оперативные критерии оцениваются по временным показателям эксплуатации средств НК, основными из которых являются: среднее время подготовки прибора к работе, среднее время измерения диагностического параметра, среднее время обработки и интерпретации результата измерения. Набор технических критериев характеризует уровень функциональных возможностей средств НК определенного типа при использовании их по назначению. Эти критерии могут иметь несколько показателей их оценки. Например, критерий «надежность» можно оценивать по совокупности показателей, таких как «коэффициент готовности», «срок службы», «среднее время безотказной работы», «вероятность безотказной работы», «ремонтпригодность» и др.

Отметим, что в ряде случаев оценочные показатели могут быть сильно коррелированы, т. е. увеличение (уменьшение) одного из них неизбежно влечет увеличение (уменьшение) другого. В этом случае такой зависимый показатель лучше исключить из исходного набора, чтобы не усложнять математическую модель задачи оптимизации избыточностью данных.

Для средств НК в соответствии со спецификой их эксплуатации на СК РКК можно выделить ряд общих критериев их оценки для оптимального выбора лучшей модели из подобных, с целью рационализации состава приборной базы мобильных лабораторий (табл. 1).

Таблица 1

Основные критерии оценки качества однотипных средств НК

Критерий	Тип критерия	Показатели критерия*	Требования к показателю оценки критерия
Надежность	Количественный	Коэффициент готовности Срок службы (долговечность) Среднее время безотказной работы Вероятность безотказной работы Ремонтпригодность Сохраняемость	Обязательны
Чувствительность	Количественный	Разрешающая способность Выявляемость дефектов Коэффициент чувствительности	Обязательны
Точность (достоверность)	Количественный	Относительная погрешность измерения Вероятность правильного измерения	Обязательны
Информативность	Количественный / Качественный	Определяется функциональными возможностями сбора и обработки информационных параметров	Желательны

Окончание табл. 1

Критерий	Тип критерия	Показатели критерия*	Требования к показателю оценки критерия
Производительность (оперативность)	Количественный	Среднее время подготовки прибора к работе Среднее время измерения диагностического параметра Среднее время обработки и интерпретации результата измерения	Желательны
Стоимость	Количественный	Затраты на приобретение Затраты на эксплуатацию Затраты на ремонт	Обязательны
Безопасность	Количественный	Взрывозащищенное исполнение Степень (класс) защиты от факторов окружающей среды (температурная, пыле- и влагозащищенность)	Желательны
Конструктивное исполнение	Количественный / Качественный	Габаритные размеры Масса Транспортабельность	Обязательны
Режимы работы	Количественный	Рабочая температура Рабочее давление Рабочая влажность Устойчивость к электромагнитным помехам (для электроприборов) Длительность автономной работы	Обязательны
Удобство (простота, эргономичность)	Качественный	Экспертная оценка	Желательны
Репутация	Качественный	Экспертная оценка (по отзывам)	Желательны
Универсальность	Количественный	Коэффициент универсальности	Желательны
Унификация	Качественный	Экспертная оценка (по технической документации)	Желательны

*Здесь и далее предполагается, что ряд основных критериев оценки качества средств НК могут характеризоваться несколькими показателями привлекательности оборудования по данному критерию.

Следует отметить, что в табл. 1 указана лишь часть общих критериев оценки средств НК, которые рекомендуется учитывать при выборе наиболее приемлемой альтернативы. При рассмотрении конкретного типа моделей приборов НК дополнительные необходимые критерии устанавливаются в соответствии с технической документацией, и их выбор зависит от назначения приборов, реализованного в них метода измерения дефектов, а также заложенного эксплуатационного функционала. Так, например, для портативных виброметров специфическими критериями оценки могут служить: «частотный диапазон», «количество измерительных каналов», «разрешение дисплея» и др. При этом, чем больше будет учтено информации по критериям оценки и чем детальнее она будет, тем выше будет вероятность правильного выбора наилучшего варианта из множества альтернатив.

Значительная часть информации о характеристиках диагностического оборудования, которую можно использовать для выбора количественных и качественных критериев его оценки, представлена в сопроводительной технической и эксплуатационной документации на соответствующее средство НК. Однако часть важных показателей оценки критериев в технических паспортах может отсутствовать или не указываться в явном виде. В данном случае рекомендуется определять их опытным путем или рассчитывать с использованием доступных для этого данных. Так показатель «вероятность безотказной работы» ($P(t)$), по которому, кроме прочих, оценивается критерий «надежность» можно рассчитать при ис-

пользовании λ -характеристики (интенсивности отказов), которая приводится в паспортных данных на оборудование [2]:

$$P(t) = e^{-\lambda t}. \quad (1)$$

На рис. 1 представлен график функции $P(t)$ при $\lambda = 0,1$ года⁻¹.

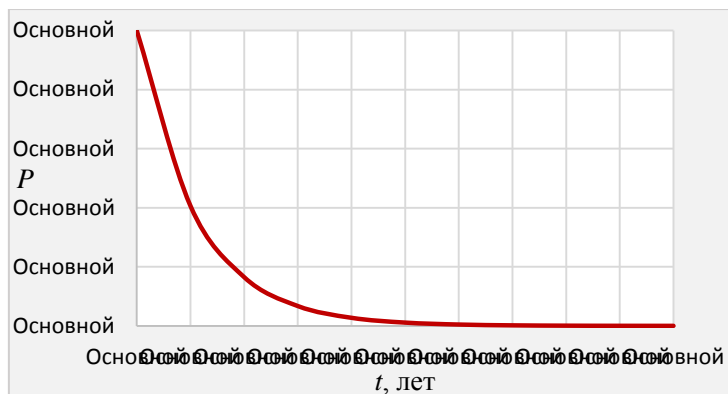


Рис. 1. График функции $P(t)$ при $\lambda = 0,1$ года⁻¹

Расчетные методы ряда экономических, оперативных и технических показателей оценки критериев сложных технических систем довольно подробно представлены в работах [2–6], а также регламентированы нормативными документами и стандартами [7–14].

Разнообразие однотипных средств НК, представленных в настоящее время на рынке, а также большое количество критериев, по которым можно провести их сравнительную оценку, позволяет рассматривать множество X , как множество Парето, которое характеризуется тем, что из множества альтернатив нельзя выбрать одну, доминирующую над остальными по всем общим критериям. Выбор лучшей альтернативы из множества Парето является сложной задачей. При этом она не имеет абсолютно оптимального решения. Поэтому при ее решении неизбежен компромисс: делать выбор в пользу альтернатив с большими показателями привлекательности одних критериев, пренебрегая показателями привлекательности других. Задачи такого рода решаются методами экспертных оценок. Возможной стратегией решения задачи по выбору оптимальной альтернативы из множества однотипных средств НК при формировании приборной базы мобильной лаборатории контроля СК РКК может служить стратегия принятия решения в условиях определенности на основе оценки средневзвешенных показателей критериев привлекательности диагностического оборудования.

Введем обозначения. Пусть G_{ij} – оценка i -й альтернативы из множества X по j -му критерию из множества K . В результате получим матрицу оценок размерностью $m \times n$:

$$\begin{bmatrix} G_{11} & \dots & G_{1n} \\ \dots & G_{ij} & \dots \\ G_{m1} & \dots & G_{mn} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где m – количество альтернатив;

n – количество критериев.

Как правило, в данной матрице приоритет (или степень важности) одних критериев по сравнению с другими будет выше, поскольку они оказывают большее влияние на принятие решения, т. е. являются более предпочтительными (весомыми) при оценке альтернативы в целом. Веса критериев устанавливаются экспертным путем, поэтому процесс агрегирования (взвешивания) критериев носит, в большей мере, субъективный характер. Однако в настоящее

время разработано достаточно большое количество методов по расчету весовых коэффициентов, которые позволяют значительно понизить фактор субъективности при их выборе [15].

Обозначим вес j -го критерия как W_j . Представим значения весов в виде вектор-столбца. Тогда можно записать:

$$\begin{bmatrix} G_{11} & \dots & G_{1n} \\ \dots & G_{ij} & \dots \\ G_{m1} & \dots & G_{mn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} W_1 \\ \dots \\ W_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} \cdot W_1 + \dots + G_{1n} \cdot W_n \\ \dots \\ G_{m1} \cdot W_1 + \dots + G_{mn} \cdot W_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ \dots \\ F_m \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$F_i = \sum_{j=1}^n G_{ij} \cdot W_j, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

где F_i – целевая функция (функция полезности) для i -ой альтернативы.

Для принятия оптимального решения нужно вычислить целевые функции каждой альтернативы, и выбрать в качестве лучшего решения ту альтернативу, для которой функция полезности максимальна (минимальна).

Очевидно, что в матрице (2) показатели оценки разных критериев будут иметь разную размерность, поэтому необходимо провести нормализацию показателей, т. е. привести их к безразмерному виду для корректного их сравнения и использования в целевой функции. Кроме того, одни критерии в матрице (2) подлежат максимизации (чем больше значение показателя, тем лучше), другие – минимизации (чем меньше значение показателя, тем лучше). Существует несколько способов нормализации данных разной размерности. Так в работах [16–17] предлагается применять минимаксный метод нормализации при решении оптимизационных задач. В случае максимизации критериев предлагается использовать формулу

$$G'_{ij} = \frac{G_{ij} - G_{\min(j)}}{G_{\max(j)} - G_{\min(j)}}, \quad (5)$$

где G'_{ij} – нормализованное значение показателя (оценки) i -й альтернативы по j -му критерию;

$G_{\min(j)}$ – минимальное значение j -го критерия по альтернативам;

$G_{\max(j)}$ – максимальное значение j -го критерия по альтернативам.

В случае минимизации критериев предлагается использовать формулу

$$G'_{ij} = \frac{G_{\max(j)} - G_{ij}}{G_{\max(j)} - G_{\min(j)}}. \quad (6)$$

При таком преобразовании, независимо, ведется максимизация или минимизация критерия, альтернатива, имеющая наилучший показатель привлекательности по какому-либо критерию, получает значение 1, наименее привлекательная – значение 0, а остальные альтернативы имеют промежуточные значения. Однако такой подход к нормализации данных в задачах оптимального выбора средств НК из множества подобных образцов может привести к неверному принятию решения при анализе полученных значений функций полезности. Приведем пример. Пусть сравниваются две альтернативы A_1 и A_2 по двум критериям: «надежность» и «достоверность» (рис. 2).

На рис. 2 видно, что у рассматриваемых альтернатив показатели привлекательности по критерию «достоверность» практически одинаковые, а по критерию «надежность» различаются очень сильно. Весовые коэффициенты имеют близкие значения с небольшим приоритетом критерия «достоверность», что вполне логично. При этом по значениям функций

полезности F следует выбрать в качестве оптимальной первую альтернативу (A_1), но это противоречит здравому смыслу: предпочтительной становится альтернатива с низким показателем по надежности, а альтернатива A_2 с высоким показателем надежности и с достоверностью, сравнимой с альтернативой A_1 , отвергается.

Альтернативы	$W = 0,4$	$W = 0,6$
	Надежность	Достоверность
A_1	0,2	7
A_2	7	6,8

 \Rightarrow

$W = 0,4$	$W = 0,6$	F
Надежность	Достоверность	
0	1	0,6
1	0	0,4

а)

б)

Рис. 2. Результат нормализации данных по формуле (5):
а – исходные данные; б – нормализованные данные и функция полезности

Такая же ситуация возникает, если использовать для нормализации известную формулу z -масштабирования:

$$G'_{ij} = \frac{G_{ij} - \mu_j}{\sigma_j}, \quad (7)$$

где μ – среднее арифметическое распределения показателей по j -му критерию;
 σ – стандартное отклонение распределения показателей по j -му критерию.

Поэтому для нормализации значений показателей критериев целесообразно использовать следующие простые формулы абсолютного масштабирования, которые позволят избежать указанных выше логических ошибок при решении задач по выбору оптимальной альтернативы из множества однотипных средств НК. В случае максимизации критериев:

$$G'_{ij} = \frac{|G_{ij}|}{|G_{\max(j)}|}. \quad (8)$$

В случае максимизации критериев:

$$G'_{ij} = 1 - \frac{|G_{ij}|}{|G_{\max(j)}|}. \quad (9)$$

На рис. 3 представлены результаты нормализации по формуле (8) с использованием данных из приведенного на рис. 2 примера. При этом результат выбора оптимальной альтернативы по максимальному значению целевой функций F представляется вполне логичным.

Альтернативы	$W = 0,4$	$W = 0,6$
	Надежность	Достоверность
A_1	0,2	7
A_2	7	6,8

 \Rightarrow

$W = 0,4$	$W = 0,6$	F
Надежность	Достоверность	
0,03	1	0,61
1	0,97	0,98

а)

б)

Рис. 3. Результат нормализации данных по формуле (8):
а – исходные данные; б – нормализованные данные и функция полезности

Таким образом, в результате применения формул (8) и (9) матрица (2) преобразуется в новую матрицу с нормализованными показателями критериев оценки однотипных средств НК:

$$\begin{bmatrix} G'_{11} & \dots & G'_{1n} \\ \dots & G'_{ij} & \dots \\ G'_{m1} & \dots & G'_{mn} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

а целевая функция для i -ой альтернативы представляется в виде взвешенной суммы:

$$F'_i = \sum_{j=1}^n G'_{ij} \cdot W_j, \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (11)$$

В процессе подготовки данных для решения поставленной оптимизационной задачи выполняется следующий комплекс экспертных мероприятий:

- выбор рабочих критериев оценки привлекательности диагностического оборудования и их ранжирование по приоритету (важности);
- постановка в соответствие качественным критериям численных значений;
- задание для каждого показателя качества оборудования минимальных требований (ограничений) к его значениям;

– расчет весовых коэффициентов локальных критериев в соответствии с их относительной важностью (при этом, как правило, для весовых коэффициентов устанавливается правило фиксированной суммы: $\sum_{j=1}^n W_j = \text{const}$).

В формализованном виде задача оптимизации может быть записана следующим образом:

$$\begin{cases} F'_i = \sum_{j=1}^n G'_{ij} \cdot W_j \rightarrow \max, & i = 1, 2, \dots, m \\ \sum_{j=1}^n W_j = \text{const} \\ G_j \geq R_j, \end{cases} \quad (12)$$

где R_j – установленное экспертным путем минимальное значение (граничное условие) для j -го критерия оценки качества оборудования (в натуральных единицах измерения – для количественных критериев, в условных единицах – для качественных критериев).

Если средство НК не удовлетворяет граничному условию по любому из критериев, его исключают из дальнейшего рассмотрения в качестве альтернативы.

Наиболее сложным и ответственным аспектом при решении этой задачи является расчет весов локальных критериев с учетом их уровня предпочтения. Простым и достаточно эффективным методом расчета весовых коэффициентов критериев является метод базового критерия. Его модификация при условии фиксированной суммы ($\sum_{j=1}^n W_j = 1$) выглядит следующим образом.

Множество локальных критериев классифицируют по степени важности на k групп, при этом группы могут содержать от 1 до n критериев. Самой младшей (базовой) группе, содержащей несущественные критерии, присваивают минимальное значение ранга (ω_k) равное 1. Остальным группам присваивают значения рангов в соответствии со степенью превосходства их критериев относительно критериев базовой группы.

Вес критериев базовой группы (W_k) рассчитывают по формуле

$$W_k = \frac{1}{\sum_{i=1}^k \omega_i}. \quad (13)$$

Вес критериев i -ой группы (W_i) рассчитывают по формуле

$$W_i = W_k \cdot \omega_i. \quad (14)$$

Данный метод расчета весовых коэффициентов позволяет задавать численное значение ранга ω_i для группы самых значимых критериев, определяющего их приоритет над наименее значимыми критериями, что является практически удобным и логически прозрачным.

В работе [14] рассмотрены и классифицированы различные методы расчета весовых коэффициентов. При этом выделены три их основные группы: методы попарного сравнения коэффициентов; методы на основе анализа взаимосвязей показателей важности оценочных критериев и формальные методы. Поскольку у каждой группы методов имеются как свои достоинства, так и недостатки, то крайне сложно сделать выбор в пользу одного из методов для решения различных оптимизационных задач на основе оценки средневзвешенных критериев привлекательности. В связи с этим целесообразно использовать комплексный подход к расчету весовых коэффициентов, а именно: рассчитывать веса критериев одновременно разными (например, тремя) методами. Далее, получив значения целевых функций (F_1, F_2, F_3) по каждому из критериев, принимать решение по их среднему значению:

$$F = \frac{F_1 + F_2 + F_3}{3}. \quad (15)$$

Кроме того, проведение верификации итогового результата другим составом квалифицированных специалистов (по аналогичной или другой математической модели) позволяет прийти либо к консенсусу, либо к компромиссному решению. Такая верификация является частью комплексного подхода к оптимизации управленческих решений и способствует ее более эффективному проведению.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в статье показаны основные методические подходы к решению задачи по выбору наилучшей альтернативы из множества однотипных средств НК для формирования приборной базы мобильных лабораторий СК РКК. Данные подходы справедливы и для других технических систем наземной космической инфраструктуры. Затронутые вопросы оптимизации предполагают разработку и внедрение в систему диагностирования текущего технического состояния технологического оборудования СК РКК автоматизированных средств принятия решений, которые позволят более оперативно решать оптимизационные задачи в условиях многокритериальности. Кроме того, применение математических подходов к расчету весовых коэффициентов значительно снижает влияние фактора субъективности при оценке множества альтернатив.

Список используемых источников

1. Типаж и техническая эксплуатация оборудования предприятий автосервиса / В.А. Першин [и др.]. – Ростов н/Д: Феникс, 2008. – 413 с.
2. Дьяков А.Н. Расчет показателей эксплуатационно-экономической эффективности // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 660. – 180 с.
3. Герасимов Л.Н. Методы расчета и анализа надежности технических систем: метод. пособие. – Иркутск: ИрГУПС, 2013. – 51 с.
4. Ветошкин А.Г. Надежность технических систем и техногенный риск. – Пенза: Изд-во ПГУАиС, 2003. – 170 с.

5. *Науменко А.П.* Введение в техническую диагностику и неразрушающий контроль: учеб. пособие. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2019. – 152 с.
6. *Диагностика и мониторинг состояния сложных технических систем: учеб. пособие / Н.А. Махутов [и др.].* – Тюмень: ТИУ, 2017. – 632 с.
7. РМГ 115-2019. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Калибровка средств измерений. Алгоритмы обработки результатов измерений и оценивания неопределенности. – М.: ФГУП «ВНИИМ им. Д.Ф. Менделеева», 2019.
8. ГОСТ Р 56512-2015. Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод. Типовые технологические процессы. – М.: ФГУП «ВНИИОФИ», НИЦ ЭРАТ; 4 ЦНИИ МО, 2015.
9. ГОСТ 23660-79. Система технического обслуживания и ремонта техники. Обеспечение ремонтпригодности при разработке изделий. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1979.
10. ГОСТ 21623-76. Система технического обслуживания и ремонта техники. Показатели для оценки ремонтпригодности. Термины и определения. – М.: Государственный комитет стандартов СССР, 1977.
11. ГОСТ 22952-78. Система технического обслуживания и ремонта техники. Методы расчета показателей ремонтпригодности по статистическим данным. – М.: Госстандарт ССР, 1978.
12. МИ 1317-2004. Рекомендация. Государственная система обеспечения единства измерений. Результаты и характеристики погрешности измерений. Формы представления. Способы использования при испытаниях образцов продукции и контроле их параметров / ГСИ ГСОЕИ. – М.: ФГУП «ВНИИМС», 2004.
13. ГОСТ Р ИСО 5725-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. – М.: ВНИИМС, ВНИИСтандарт, ВНИИКИ, 2002.
14. ГОСТ Р 8.736-2011. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. – М.: ФГУП «ВНИИМ им. Д.Ф. Менделеева», 2011.
15. *Постников В.М., Спиридонов С.Б.* Методы выбора весовых коэффициентов локальных критериев // Наука и образование: Научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2015. – № 06. – С. 267–287.
16. Минимизация потенциальной экологической опасности при размещении отходов / *И.Л. Манжуров [и др.]* // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. – URL: <http://www.scienceeducation.ru/119-15034> (дата обращения: 21.09.2021).
17. *Шамсутдинова Т.М.* Лабораторные работы. Методы поддержки принятия решений: метод. указания. – Уфа: Изд-во Башкирского гос. аграрного ун-та, 2018. – 14 с.
18. *Постников В.М., Спиридонов С.Б.* Подход к выбору варианта модернизации сервера ЛВС // Наука и образование. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 190 с.

А.Д. Голяков,
доктор технических наук, профессор;
А.М. Ричняк,
кандидат технических наук, доцент

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ АВТОНОМНОЙ НАВИГАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПРИ ОТКАЗЕ АСТРОНОМИЧЕСКОГО ДАТЧИКА

Показана принципиальная возможность определения всех параметров движения центра масс космического аппарата по измерениям высоты его полета над поверхностью Земли и зенитного расстояния звезды. Представлены результаты математического моделирования, которые показывают, что с помощью алгоритмической избыточности существуют условия обеспечения информационной надежности системы автономной навигации при отказе астрономического датчика.

Ключевые слова: система автономной навигации, космический аппарат, отказ астрономического датчика, точность определения параметров движения, информационная надежность, алгоритмическая избыточность.

ВВЕДЕНИЕ

Для достижения современных требований к продолжительности активного существования автономных космических аппаратов (КА) со сроками более 15 лет интенсивное развитие получает методология поэтапного обеспечения надежности [1]. Согласно этой методологии, на всех этапах жизненного цикла КА в зависимости от технической реализуемости применяются рекомендуемые нормативными документами [2, 3] методы сохранения работоспособного состояния бортовых систем КА.

Одной из важнейших бортовых систем КА является система автономной навигации (САН), которая предназначена для определения параметров движения центра масс КА на основании результатов навигационных измерений, выполняемых бортовыми приборами. При возникновении отказа САН информация о параметрах движения центра масс КА либо не определяется, либо определяется, но с погрешностью, которая не соответствует заданным значениям показателей точности. В соответствии с концепцией, введенной в монографии [4], отказ САН в первом случае называется аппаратным, а во втором случае – информационным. Раздел теории надежности, в которой изучаются закономерности распределения информационных отказов, причины и модели их возникновения, получила название теории информационной надежности [5].

Согласно этой теории, под информационной надежностью САН будем понимать такое ее свойство, которое характеризует способность системы оценивать параметры движения центра масс КА в течение заданного времени с заданными значениями показателей точности в заданных режимах и условиях применения.

В настоящей статье для поиска путей обеспечения информационной надежности САН выбрана оптико-электронная система, в которой источниками получения навигационной информации является комплекс бортовых приборов, содержащий астрономические датчики (АД). Для парирования отказов, возникающих в процессе летной эксплуатации САН, используется метод резервирования, основанный, как правило, на структурной избыточности [6]. Применение структурной избыточности вызывает рост массогабаритных характеристик бортовых систем КА. Одним из способов избежать этого недостатка является использование алгоритмической избыточности [7–9].

Исследования, посвященные алгоритмической избыточности для обеспечения информационной надежности САН КА, представляют собой не только теоретический, но и значи-

тельный практический интерес. Введение алгоритмической избыточности связано с необходимостью проведения реконфигурации программного обеспечения специализированного бортового вычислителя (СБВ) САН КА при обнаружении аппаратурного или информационного отказа бортовой аппаратуры.

Целью настоящей статьи является исследование зависимостей показателей точности САН от угловых координат навигационной звезды и информационной надежности САН при отказе АД на основе алгоритмической избыточности.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Предположим, что параметрами движения КА являются координаты $X(t), Y(t), Z(t)$ и составляющие вектора скорости $V_x(t), V_y(t), V_z(t)$ в момент времени t в выбранной системе отсчета XYZ. Тогда вектор параметров движения КА, оцениваемый с помощью САН, принимает вид

$$Q(t) = [X(t) Y(t) Z(t) V_x(t) V_y(t) V_z(t)]^T. \quad (1)$$

Показателем точности САН является вектор погрешностей оценок параметров движения центра масс КА:

$$\Delta \hat{Q}(t) = \hat{Q}(t) - Q_0(t) - q(t), \quad (2)$$

где $\hat{Q}(t)$ – оценка вектора (1), полученная с помощью САН;

$Q_0(t)$ – опорный вектор параметров движения КА, который хранится в памяти СБВ САН;

$q(t)$ – вектор смещения истинных параметров движения центра масс КА относительно опорных значений.

Заданные в ТЗ требования к показателям точности САН можно представить в виде вектора

$$\Delta Q_{ТЗ}(t) = [\Delta X_{ТЗ}(t) \Delta Y_{ТЗ}(t) \Delta Z_{ТЗ}(t) \Delta V_{xТЗ}(t) \Delta V_{yТЗ}(t) \Delta V_{zТЗ}(t)]^T, \quad (3)$$

где $\Delta X_{ТЗ}(t), \Delta Y_{ТЗ}(t), \Delta Z_{ТЗ}(t)$ и $\Delta V_{xТЗ}(t), \Delta V_{yТЗ}(t), \Delta V_{zТЗ}(t)$ – заданные в ТЗ допустимые погрешности оценивания координат и составляющих вектора скорости КА соответственно.

Значения элементов вектора (3) устанавливаются на основании анализа функций, выполнение которых определяется целевой задачей КА.

В работоспособном состоянии САН КА находится до момента наступления полного или частичного отказа, который может быть аппаратурным или информационным. Признаком нарушения работоспособного состояния САН КА, обусловленного полным информационным отказом, является невыполнение всех шести неравенств, входящих в условие работоспособности:

$$\left. \begin{aligned} |\Delta \hat{X}(t)| &\leq \Delta X_{ТЗ}(t), \\ |\Delta \hat{Y}(t)| &\leq \Delta Y_{ТЗ}(t), \\ |\Delta \hat{Z}(t)| &\leq \Delta Z_{ТЗ}(t), \\ |\Delta \hat{V}_x(t)| &\leq \Delta V_{xТЗ}(t), \\ |\Delta \hat{V}_y(t)| &\leq \Delta V_{yТЗ}(t), \\ |\Delta \hat{V}_z(t)| &\leq \Delta V_{zТЗ}(t). \end{aligned} \right\}. \quad (4)$$

При частичной работоспособности САН КА часть неравенств из совокупности (4) не выполняется, а другая ее часть выполняется. Вызывающий такое состояние САН КА отказ является частичным информационным отказом. При наступлении частично информационного отказа САН не способна оценить все параметры движения центра масс КА с указанной в ТЗ точностью.

Исследования частичного аппаратного отказа оптико-электронной САН, которая содержит специализированный бортовой вычислитель, два АД и построитель местной вертикали, проведены в работе [6]. Результаты исследований показали, что при аппаратном отказе одного из АД САН, отсутствует принципиальная возможность уточнения вектора (1), но сохраняется способность САН к уточнению пяти параметров движения КА. Частично работоспособное состояние САН обеспечивается в том случае, когда орт навигационной звезды не совпадает с плоскостью или нормалью орбиты КА.

Исследуем точность САН, бортовая аппаратура которой состоит из СБВ, двух АД, построителя местной вертикали и высотомера. Структурная схема САН КА приведена на рис. 1.

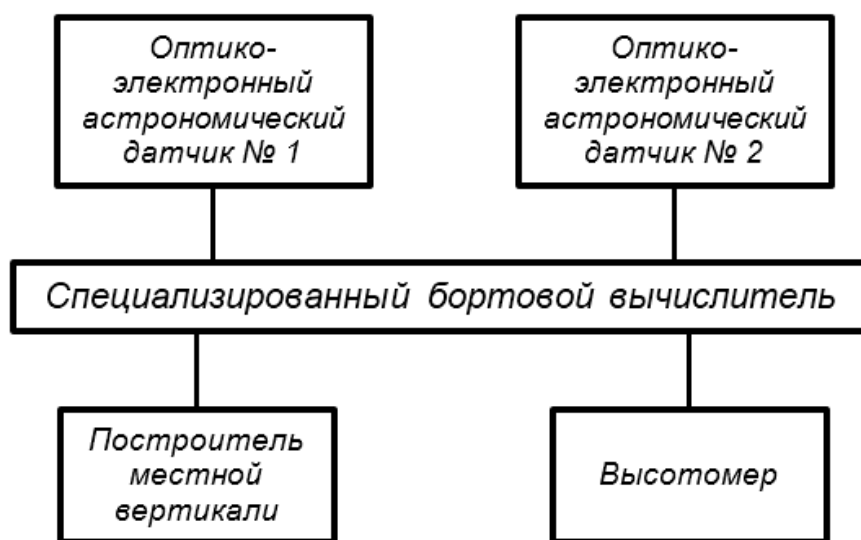


Рис. 1. Структурная схема САН

Оптические оси F_1 и F_2 АД расположены в пространстве таким образом, что направление на первую звезду S_1 совпадает с плоскостью орбиты КА, а направление на вторую звезду S_2 – с бинормалью орбиты КА. Положение оптических осей АД САН относительно плоскости орбиты КА показано на рис. 2.

В монографии [10] доказано, что такое расположение звезд является оптимальным по критерию точности навигации КА. Выбор навигационных звезд в других точках небесной сферы приводит к снижению точности решения навигационной задачи.

Предположим, что произошел отказ одного из АД, который обнаружен бортовой системой контроля и диагностики. Для парирования отказа АД воспользуемся алгоритмической избыточностью, которая представляет собой дополнительный резервный алгоритм, реализованный в программном обеспечении СБВ САН КА. Отличительная особенность резервного алгоритма заключается в том, что для решения навигационной задачи с точностью, установленной в ТЗ, используются результаты измерений зенитного расстояния одной звезды и высоты полета КА. Измеряемые бортовыми приборами САН зенитное расстояние звезды (β) и высота полета КА (H) показаны на рис. 3.

Резервный алгоритм, используемый для решения задачи сохранения работоспособности САН КА при отказе АД, разрабатывается и вводится в алгоритмическое обеспечение СБВ до момента пуска КА. Он представляет собой дополнительный навигационный алгоритм, в котором вектор невязок измерений в статистическом фильтре обработки результатов измерений является двумерным, в отличие от трехмерного вектора основного алгоритма. Математические модели и процедуры (подпрограммы), применяемые для обеспечения работы этого фильтра, остаются штатными, за исключением подпрограммы выбора навигационной звезды.

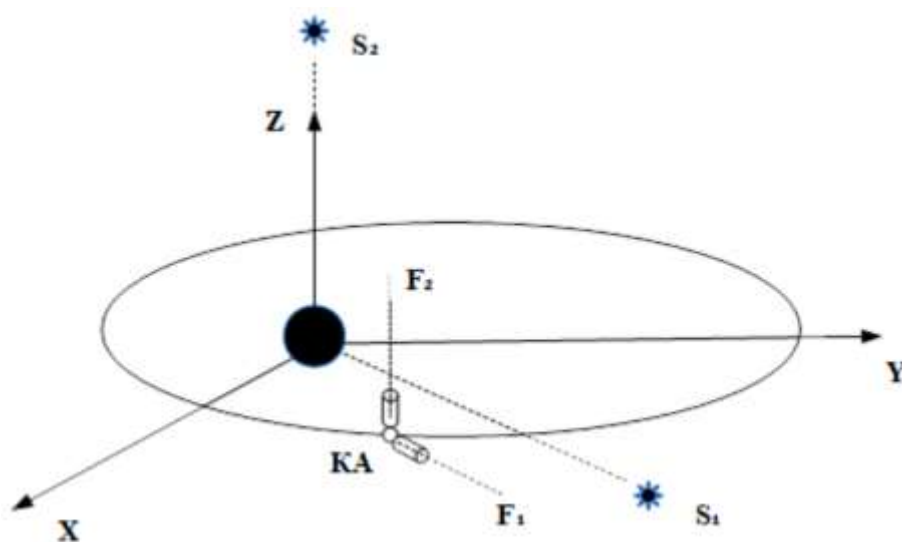


Рис. 2. Положение оптических осей астрономических датчиков САН относительно плоскости орбиты КА

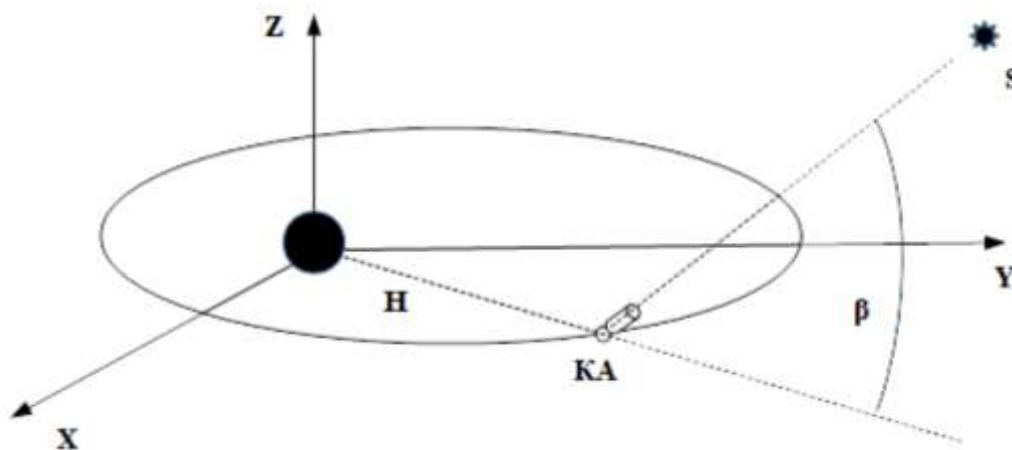


Рис. 3. Зенитное расстояние звезды (β) и высота полета КА (H), измеряемые бортовыми приборами САН

Разработка этой программы проводится на основании результатов исследований, приведенных в монографии [6], согласно которым при расположении орта звезды в плоскости орбиты КА или совпадении его с направлением бинормали орбиты КА отсутствует принципиальная возможность решения навигационной задачи по измерениям зенитного расстояния одной звезды. В связи с этим положение навигационной звезды на небесной сфере

целесообразно определять относительно плоскости орбиты КА двумя углами – орбитальными восхождением α_0 и склонением δ_0 , которые изображены на рис. 4.

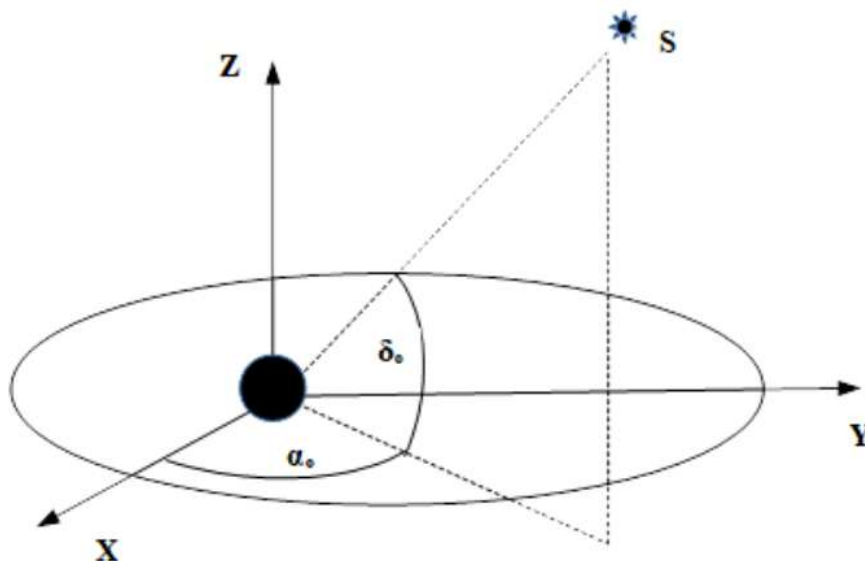


Рис. 4. Орбитальное восхождение и склонение звезды

При решении задачи парирования отказа АД с помощью алгоритмической избыточности орбитальные восхождение (α_0) и склонение (δ_0) звезды в подпрограмме выбора навигационной звезды резервного алгоритма выбираются с учетом выполнения условия работоспособности САН КА (4).

Для определения возможных диапазонов углов α_0 и δ_0 , при которых обеспечивается работоспособность САН КА при отказе АД, выполним исследования зависимости показателей точности САН КА от орбитальных угловых координат навигационной звезды.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТОЧНОСТИ СИСТЕМЫ АВТОНОМНОЙ НАВИГАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ОТ ОРБИТАЛЬНЫХ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ НАВИГАЦИОННОЙ ЗВЕЗДЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИАПАЗОНОВ УГЛОВ α_0 И δ_0 , ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ РАБОТОСПОСОБНОСТЬ САН КА ПРИ ОТКАЗЕ АСТРОНОМИЧЕСКОГО ДАТЧИКА

Для исследования зависимости показателей точности САН КА от орбитальных угловых координат навигационной звезды воспользуемся методом математического моделирования. С целью упрощения исследования при сохранении основных законов движения КА и принципов построения современных САН введем следующие допущения.

Движение КА рассмотрим в подвижной орбитальной системе координат $хуz$. Ось x системы совпадает с радиусом-вектором КА в начальный момент времени t_0 , ось z – с нормалью к плоскости орбиты КА, а ось y дополняет систему координат до правой и лежит в плоскости орбиты КА (рис. 5).

Предположим, что движение КА происходит в центральном поле сил. Опорная орбита КА является круговой, лежащей в плоскости осей x и y . Высота опорной орбиты $H_0 = 300$ км.

Навигационная задача решается с помощью САН, приборный состав которой обеспечивает определение оценок параметров движения КА по измерениям зенитных углов двух звезд и

высоты полета КА. Визирные оси первого и второго АД совмещены с направлениями ортов навигационных звезд, которые совпадают с осями X и Z геоцентрической орбитальной системы координат XYZ .

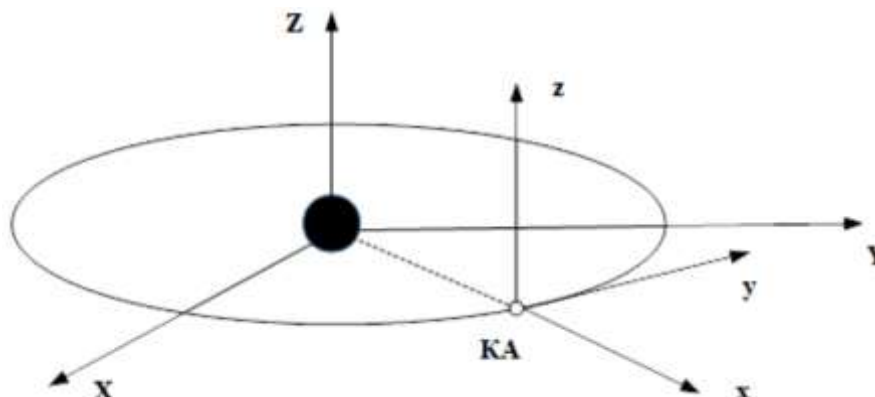


Рис. 5. Подвижная орбитальная система координат

Результаты измерений углов $\tilde{\beta}(t)$, где $(i=1,2)$, и высоты $\tilde{H}(t)$ полета КА содержат случайные погрешности, которые не коррелированы и распределены по нормальному закону с нулевыми математическими ожиданиями и известными среднеквадратическими отклонениями $\sigma_{\beta} = 0,1$ угл. мин и $\sigma_H = 1000$ м соответственно.

Обработка результатов навигационных измерений выполняется методом наименьших квадратов. Продолжительность интервала измерений составляет один виток, в течение которого бортовые средства проводят 100 измерений.

Полученный с помощью метода наименьших квадратов вектор оценок параметров движения КА $\hat{Q}(t)$ представляет собой случайный вектор. Характеристикой его точности выступает ковариационная матрица, на главной диагонали которой находятся дисперсии погрешностей оценок параметров движения центра масс КА.

При исследовании точности САН в качестве показателя разброса погрешностей ее функционирования воспользуемся вектором, элементами которого являются оценки среднеквадратических отклонений погрешностей параметров движения центра масс КА:

$$S = \left[S_x \ S_y \ S_z \ S_{V_x} \ S_{V_y} \ S_{V_z} \right]^T. \quad (5)$$

Здесь S_{ξ} – оценки среднеквадратических отклонений погрешностей параметров движения центра масс КА, где ξ – параметр движения центра масс КА:

$$\xi = x, y, z, V_x, V_y, V_z.$$

Для статистической оценки вектора погрешностей параметров движения центра масс КА используем метод статистических испытаний. Расчет ξ -го элемента вектора (5) выполним по формуле

$$S_{\xi} = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n \left(\Delta \hat{Q}_{\xi k}(t_0) - \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \Delta \hat{Q}_{\xi k}(t_0) \right)^2, \quad (6)$$

где n – количество повторений процедуры решения навигационной задачи при проведении статистических испытаний, которое при исследованиях установим равным $n = 50$;

$\Delta\hat{Q}_{\xi k}(t_0)$ – погрешность оценки ξ -го элемента вектора $\Delta\hat{Q}_{\xi k}(t_0)$, полученная на k -ом этапе статистических испытаний.

Предположим, вектор смещения истинных параметров движения центра масс КА относительно опорных значений в начальный момент времени t_0 и вектор, характеризующий требования к точности функционирования САН, соответственно равны:

$$\left. \begin{aligned} q(t_0) &= [10 \text{ км} \quad -10 \text{ км} \quad 10 \text{ км} \quad 10 \text{ м/с} \quad -10 \text{ м/с} \quad 10 \text{ м/с}]^T; \\ \Delta Q_{ТЗ}(t_0) &= [0,6 \text{ км} \quad 0,6 \text{ км} \quad 0,3 \text{ км} \quad 0,6 \text{ м/с} \quad 0,6 \text{ м/с} \quad 0,3 \text{ м/с}]^T. \end{aligned} \right\}$$

Показатели точности САН КА, полученные по результатам статистического моделирования с учетом принятых исходных данных, приведены в табл. 1, где предельная погрешность получена по правилу «трех сигм».

Таблица 1

Показатели точности САН КА при отсутствии отказа АД

Показатель точности	Параметр движения КА					
	X, км	Y, км	Z, м/с	V_x , м/с	V_y , км	V_z , м/с
Среднее значение	-0,01	0,01	-0,02	0,02	0,01	0,01
Среднеквадратическое отклонение	0,04	0,07	0,07	0,04	0,03	0,03
Предельная погрешность	0,12	0,21	0,21	0,12	0,09	0,09

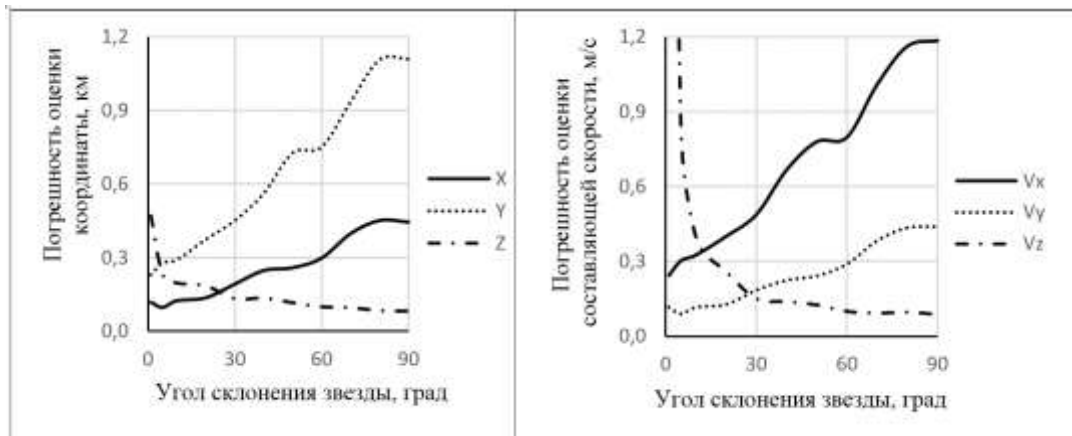
Сравнение результатов проведенного статистического моделирования, которые представлены в табл. 1, с требованиями, установленными в ТЗ, показывает, что в соответствии с условием (4) САН КА находится в работоспособном состоянии.

Предположим, что в момент времени t_0 произошел аппаратный отказ одного АД, который обнаружен бортовой системой контроля и диагностики технического состояния КА. Исследуем возможность сохранения работоспособного состояния САН КА после отказа АД, т. е. определим, способна ли САН по результатам измерений зенитных углов одной звезды и высоты полета КА найти вектор $\hat{Q}(t_0)$ с заданной в ТЗ точностью.

С помощью метода математического моделирования найдем зависимости предельных погрешностей $S_{\xi}(t_0)_{\text{limit}}$ оценок параметров движения центра масс КА от вектора орбитальных угловых координат навигационной звезды $K = [\alpha_0 \quad \beta_0]^T$. Поскольку оценки, определяемые с помощью соотношения (6), распределены по нормальному закону, для расчета предельных погрешностей воспользуемся правилом «трех сигм», т. е. $S_{\xi}(t_0)_{\text{limit}} = 3 \cdot S_{\xi}$.

Исследование выполним при условии, что орбитальное восхождение навигационной звезды принимает следующие значения: $\alpha_0 = 0^\circ$, $\alpha_0 = 30^\circ$, $\alpha_0 = 60^\circ$ и $\alpha_0 = 90^\circ$. Графики зависимостей предельных погрешностей САН по координатам и составляющим скорости КА от угла склонения навигационной звезды приведены на рис. 6–9.

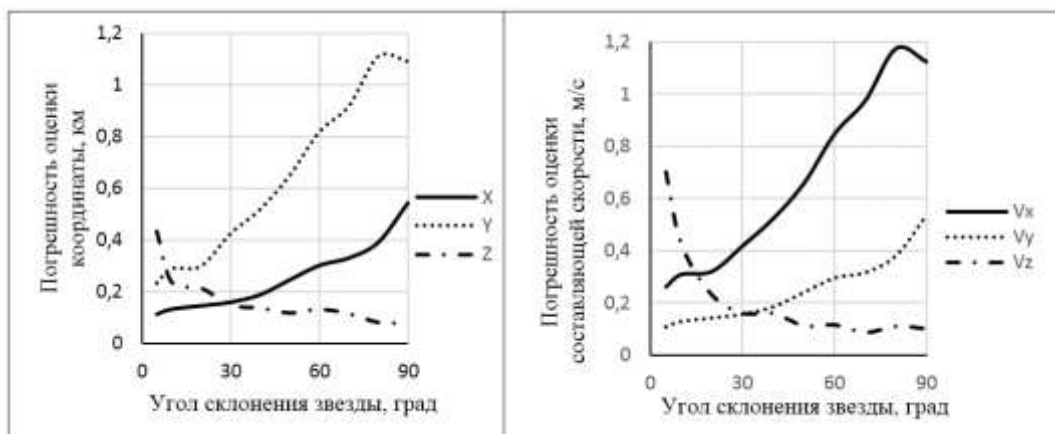
Анализ представленных графических зависимостей показывает, что при выбранных значениях углов восхождения навигационной звезды с ростом угла ее склонения увеличиваются погрешности параметров движения САН, которые характеризуют движение КА в его орбитальной плоскости, и снижаются погрешности оценок параметров, которые характеризуют движение КА в направлении по бинормали орбиты КА. При этом погрешности САН, характеризующие движение КА в плоскости орбиты по трансверсальной координате Y и радиальной составляющей скорости V_x , превышают значения погрешностей других параметров движения КА.



а)

б)

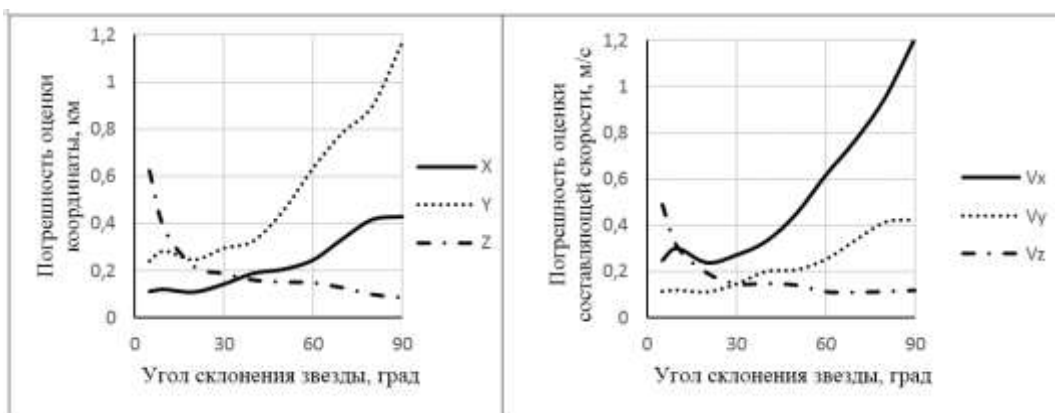
Рис. 6. Графики зависимостей предельных погрешностей САН: а – по координатам КА (X, Y, Z); б – по составляющим скорости КА (V_x, V_y, V_z) от угла склонения навигационной звезды при орбитальном восхождении $\alpha_0 = 0^\circ$



а)

б)

Рис. 7. Графики зависимостей предельных погрешностей САН: а – по координатам КА (X, Y, Z); б – по составляющим скорости КА (V_x, V_y, V_z) от угла склонения навигационной звезды при орбитальном восхождении $\alpha_0 = 30^\circ$



а)

б)

Рис. 8. Графики зависимостей предельных погрешностей САН: а – по координатам КА (X, Y, Z); б – по составляющим скорости КА (V_x, V_y, V_z) от угла склонения навигационной звезды при орбитальном восхождении $\alpha_0 = 60^\circ$

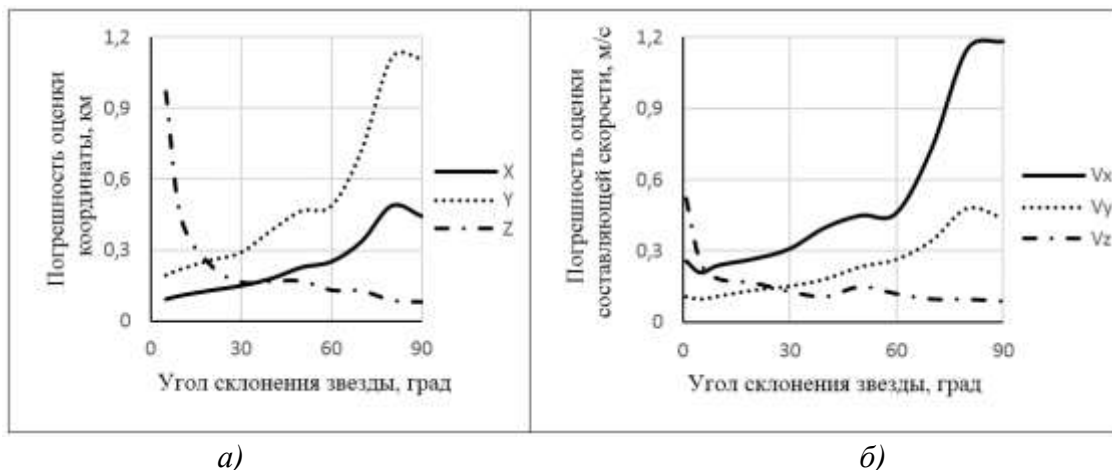


Рис. 9. Графики зависимостей предельных погрешностей САН:

а – по координатам КА (X, Y, Z); б – по составляющим скорости КА (V_x, V_y, V_z) от угла склонения навигационной звезды при орбитальном восхождении $\alpha_0 = 90^\circ$

Параметры движения КА по оси z орбитальной системы координат определяются с погрешностями значения, которые меньше погрешностей оценок в орбитальной плоскости, при углах склонения навигационной звезды более $30^\circ - 50^\circ$.

Из результатов математического моделирования следует, что одним из способов парирования отказа АД и обеспечения информационной надежности САН КА является применение резервирования на основе алгоритмической избыточности. При этом работоспособность САН может быть сохранена с помощью резервного алгоритма СБВ, в котором орбитальные координаты навигационной звезды выбираются из условия выполнения требований (4).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Одним из способов обеспечения информационной надежности САН, которые применяются на КА с длительными сроками активного существования, является использование алгоритмической избыточности. Для обоснования целесообразности введения средств алгоритмической избыточности в САН методом математического моделирования проведено исследование возможности решения навигационной задачи по измерениям зенитного расстояния звезды и высоты полета КА.

С помощью метода статистических испытаний получены зависимости точности функционирования САН КА от орбитальных координат навигационной звезды и представлены условия, при которых сохраняется работоспособное состояние САН при отказе одного АД. Приведенные количественные характеристики точности решения навигационной задачи носят демонстрационный характер, поскольку получены в условиях введенных ограничений и принятых допущений.

Полученные результаты могут быть использованы на этапе обоснования структуры САН длительного существования и анализа способов обеспечения заданных в ТЗ требований к информационной надежности бортовой аппаратуры КА.

Список используемых источников

1. Патраев В. Е., Максимов Ю. В. Методы обеспечения надежности бортовой аппаратуры космических аппаратов длительного функционирования // Изв. ВУЗов. Приборостроение. – 2008. – Т. 51, № 8. – С. 5–12.

2. ГОСТ Р 27.015-2019. Надежность в технике. Управление надежностью. Руководство по проектированию надежности систем. – М.: Стандартинформ, 2019. – 27 с.
3. ГОСТ Р 56526-2015. Требования к надежности и безопасности космических систем, комплексов и автоматических космических аппаратов единичного (мелкосерийного) изготовления с длительными сроками активного существования. – М.: Стандартинформ, 2019. – 28 с.
4. *Дмитриев С.П., Колесов Н.В., Осипов А.В.* Информационная надежность, контроль и диагностика навигационных систем. – СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2003. – 207 с.
5. Контроль и информационная надежность резервированных инерциальных систем / А.В. Черновдаров [и др.] // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». – 2016. – Т. 2. – С. 85–88.
6. Автономная навигация космических аппаратов / Г.П. Аншаков [и др.]. – Самара: ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс», 2011. – 486 с.
7. *Шубинский И.Б.* Функциональная надежность информационных систем. Методы анализа. – М.: ООО «Журнал Надежность», 2012. – 296 с.
8. Использование информационной избыточности при построении сбоеустойчивых комбинационных схем / С.В. Гаврилов [и др.] // Таврический вестник информатики и математики. – 2018. – № 2 (39). – С. 29–44.
9. *Дрожжин А.Д., Джусь О.А.* Анализ методов повышения точности и надежности данных о параметрах движения аэродинамического летательного аппарата // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 3. – С. 124–133.
10. *Порфирьев Л.Ф., Смирнов В.В., Кузнецов В.И.* Аналитические оценки точности автономных методов определения орбит. – М.: Машиностроение, 1987. – 280 с.

М.Ю. Зоткин,

кандидат технических наук;

В.И. Миронов,

доктор технических наук, профессор

АЛГОРИТМ СТАБИЛИЗАЦИИ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ОРБИТАЛЬНЫМ ОБЪЕКТОМ

Представлен алгоритм стабилизации малого космического аппарата (МКА) при решении задач наблюдения за орбитальным объектом (ОО), в котором учитываются параметры по кинематическим и динамическим параметрам углового движения. Проведено численное моделирование, которое показало, что в принятых расчетных условиях алгоритм стабилизации МКА при решении задач наблюдения за ОО позволяет повысить точность углового сопровождения ОО в 1,5–2 раза по сравнению с алгоритмом, в котором учитывается только требование по кинематическим параметрам в конце интервалов стабилизации.

Ключевые слова: малый космический аппарат, орбитальный объект, стабилизация, кватернионы, метод «Многошаговой стабилизации».

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день одним из главных приоритетов в космической деятельности является создание малых космических аппаратов (МКА), которые предназначены для наблюдения орбитальных объектов (ОО).

При решении задач МКА должен выполнять:

- угловые развороты;
- угловое сопровождение ОО;
- маневры;
- облет ОО и др.

При решении задачи углового сопровождения МКА необходимо поддерживать свое угловое положение для выполнения операций путем стабилизации связанных осей в условиях действия различных возмущающих факторов.

На угловое движение МКА оказывают влияние внешние возмущающие факторы, такие как гравитационное поле Земли, атмосфера, магнитное поле Земли. При управлении КА, имеющими сложную конструкцию, такими как орбитальная станция или тяжелые КА с разнесенными панелями солнечных батарей, учитываются все характеристики их упругости. Однако, применительно к КА, относящемуся к классу малых КА, допустимо представление его модели, как абсолютно жесткого твердого тела, поэтому влияние указанных факторов при формировании управления можно пренебречь.

Изложенное выше свидетельствует о том, что на угловое движение МКА оказывает влияние большое число возмущений, которые имеют различную природу и носят случайный характер. Их характеристики всегда индивидуальны и соответствуют конкретному МКА, кроме того, они далеко не всегда известны с необходимой точностью и поэтому их полноценный учет в бортовых алгоритмах управления не представляется возможным. Однако имеются пути повышения точности управления при наличии возмущений за счет использования метода «Многошаговой стабилизации» [4].

Вместе с тем, необходимо отметить, что метод «Многошаговой стабилизации» по своей сути уже в определенной мере обладает адаптивными свойствами по отношению к действию целого ряда возмущений. Действительно, в методе на каждом интервале управление формируется по текущим навигационным данным, определяющим текущие значения угловых па-

раметров и элементов вектора угловой скорости МКА. При этом используются номинальные (расчетные) значения характеристик объекта и его управляющих реактивных двигателей (УРД).

При реализации полученной программы стабилизации возмущения приводят к отклонению терминальных значений параметров углового движения от требуемых значений в конце данного интервала. После определения отклонений необходимо найти новое стабилизирующее управление по новым навигационным оценкам текущих параметров ориентации. Однако эти оценки параметров ориентации определяются по данным бортовых измерительных приборов и поэтому учитывают влияние возмущений, действующих на предшествующем интервале.

Таким образом, в методе реализуется обратная связь через уточнение текущих параметров ориентации, которая с точностью до ошибок определения текущих параметров углового движения, во-первых, ограничивает влияние возмущений только в пределах одного шага стабилизации, и во-вторых, исключает распространение их влияния на другие последующие участки стабилизации. Однако, данный метод учитывает управление только по одному каналу – по углу крена, в связи с этим разработка алгоритма стабилизации МКА при решении задач наблюдения за ОО, который позволяет реализовать управление угловым движением по трем осям ориентации одновременно, является актуальной задачей.

В разработанном алгоритме стабилизации МКА при решении задач наблюдения за ОО расчетными условиями являются навигационная информация о параметрах ориентации МКА, рассчитанная программа углового сопровождения ОО, а также возмущающие факторы, действующие на МКА. Задача стабилизации МКА заключается в том, что на каждом участке решается задача управления, обеспечивающая перевод МКА из текущего углового состояния p_0, ω_0 в требуемое конечное состояние p_1, ω_1 , соответствующее текущему интервалу ΔT .

Разработанный и представленный в статье алгоритм стабилизации МКА при решении задач наблюдения за ОО, отличается от известных тем, что позволяет реализовать управление угловым движением по трем осям одновременно с двумя участками включения управляющего реактивного двигателя в условиях действия возмущающих факторов.

АЛГОРИТМ СТАБИЛИЗАЦИИ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ОРБИТАЛЬНЫМ ОБЪЕКТОМ

Анализ работы [3] показывает, что возможности стабилизации командной программы управления значительно расширяются, если при формировании управляющей функции дополнительно учесть терминальные ограничения по конечной угловой скорости на каждом интервале метода «Многошаговой стабилизации».

Действительно, если, помимо первого включения управляющего момента, который использовался в алгоритме работы [3], ввести второе включение в конце временного интервала, то появится еще один управляющий параметр – длительность второго включения. Тем самым возможности управления увеличатся и это позволит расширить диапазон работоспособности алгоритма стабилизации в условиях действия возмущений. Такое релейное управление обеспечивает оптимальную по расходу рабочего тела стабилизацию командной программы.

При построении такой двухпараметрической схемы стабилизации по каждому каналу удобно в качестве второго управляющего параметра рассматривать не длительность, а начало второго включения управляющего момента. Два параметра управления, длительность первого включения τ_{1i} и момент времени, соответствующий началу второго включения τ_{2i} , будем использовать для удовлетворения двух терминальных граничных условий [5]:

$$\tilde{y}_i(1) = \tilde{y}_{ki}, \quad \tilde{\omega}_i(1) = \tilde{\omega}_{ki}. \quad (1)$$

Начальные значения угловых параметров и уравнения углового движения принимаются такими же, как и в работе [3].

В зависимости от конкретных начальных и требуемых конечных параметров углового состояния, формируемых на каждом временном интервале метода, возможны различные четыре варианта структуры управляющих функций $u_i(\tau)$ в зависимости от знака управляющего момента при первом и втором включении УРД по каждому каналу. Эти варианты схематично показаны на рис. 1–4.

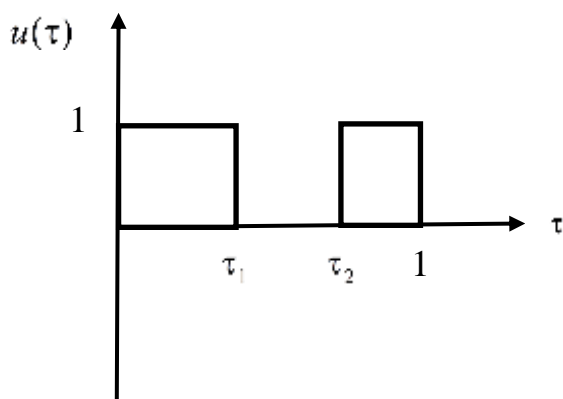


Рис. 1. Управление $u(\tau)$ «+, +»

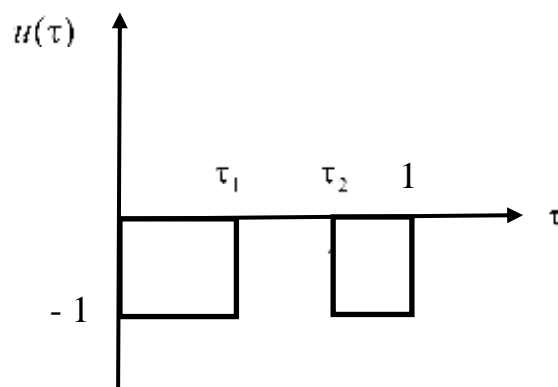


Рис. 2. Управление $u(\tau)$ «-, -»

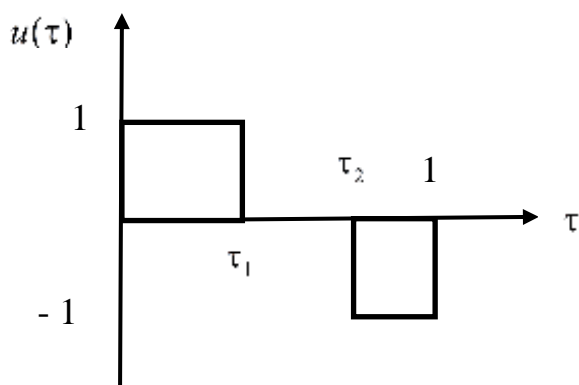


Рис. 3. Управление $u(\tau)$ «+, -»

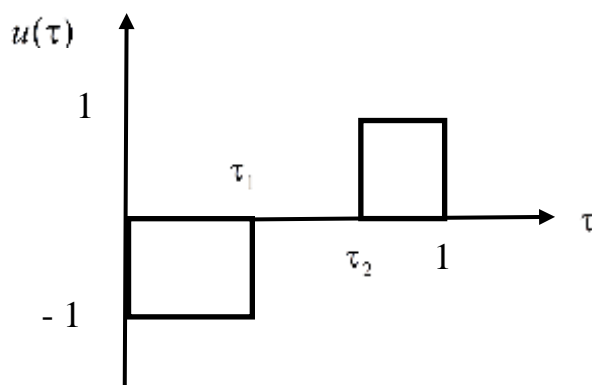


Рис. 4. Управление $u(\tau)$ «-, +»

Далее необходимо определить моменты времени τ_{1i} и τ_{2i} переключения УРД по каждому каналу стабилизации. Для этого вычислим одно- и двукратные интегралы от обеих частей динамических и кинематических уравнений движения МКА [1]. Тогда неизвестные параметры управления должны будут удовлетворять следующей системе краевых условий:

$$\begin{cases} \tilde{\omega}_{ki}(1) = \tilde{\omega}_{0i} + \int_0^1 u_i(\tau) d\tau, \\ \tilde{y}_{ki}(1) = \tilde{y}_{0i} + \tilde{\omega}_{0i} + \int_0^1 d\tau \int_0^\tau u_i(\tau) d\tau. \end{cases} \quad (2)$$

Используя известные правила вычисления кратных интегралов, эти уравнения можно представить в следующем виде:

$$\begin{cases} \tilde{\omega}_{ki}(1) = \tilde{\omega}_{0i} + \int_0^1 u_i(\tau) d\tau, \\ \tilde{y}_{ki}(1) = \tilde{y}_{0i} + \tilde{\omega}_{0i} + \int_0^1 (1-\tau)u_i(\tau) d\tau. \end{cases} \quad (3)$$

При расчете интегралов, входящих в эти уравнения, необходимо учитывать ступенчатый характер управляющих функций, показанных на рис. 1–4:

$$u_i(\tau) = \begin{cases} u_{1i}, & \text{при } 0 < \tau \leq \tau_{1i}; \\ 0, & \text{при } \tau_{1i} < \tau < \tau_{2i}; \\ u_{2i}, & \text{при } \tau_{2i} \leq \tau \leq 1, \end{cases}$$

где $u_{ij} = 1 \cdot \text{sign } u_{ij}$.

Это позволяет непосредственно выразить данные уравнения через неизвестные моменты времени включения τ_{1i} и выключения τ_{2i} двигателей ориентации на начальном и конечном участках стабилизирующего углового разворота.

После вычисления интегралов, входящих в приведенную выше систему, получаем следующую систему уравнений относительно неизвестных параметров τ_{1i} и τ_{2i} :

$$\begin{cases} \tau_{1i}u_{1i} + (1-\tau_{2i})u_{2i} = \tilde{\omega}_{ki}(1) - \tilde{\omega}_{0i} \\ (\tau_{1i} - \frac{\tau_{1i}^2}{2})u_{1i} + [\frac{1}{2} - (\tau_{2i} - \frac{\tau_{2i}^2}{2})]u_{2i} = \tilde{y}_{ki}(1) - \tilde{y}_{0i} - \tilde{\omega}_{0i}. \end{cases} \quad (4)$$

При решении этих уравнений рассмотрим вначале случаи, показанные на рис. 1 и 2, когда $u_{1i} = u_{2i}$, т. е. когда $|u_{1i}| = |u_{2i}| = 1$, а знаки $\text{sign } u_{1i} = \text{sign } u_{2i}$. В данном случае уравнения (4) принимают следующий вид:

$$\begin{cases} \tau_{1i} + (1-\tau_{2i}) = [\tilde{\omega}_{ki}(1) - \tilde{\omega}_{0i}] \text{sign } u_{1i} \\ (\tau_{1i} - \frac{\tau_{1i}^2}{2}) + [\frac{1}{2} - (\tau_{2i} - \frac{\tau_{2i}^2}{2})] = [\tilde{y}_{ki}(1) - \tilde{y}_{0i} - \tilde{\omega}_{0i}] \text{sign } u_{1i}. \end{cases}$$

Полученная система уравнений имеет следующее решение:

$$\tau_{1i} = \frac{(p_{2i}-1) + (p_{1i}-1)^2}{2(p_{1i}-1)}; \quad \tau_{2i} = \frac{(p_{2i}-1) - (p_{1i}-1)^2}{2(p_{1i}-1)},$$

где

$$\begin{aligned} p_{1i} &= [\tilde{\omega}_{ki}(1) - \tilde{\omega}_{0i}] \text{sign } u_{1i}; \\ p_{2i} &= 2[\tilde{\omega}_{ki} - \tilde{y}_{ki}(1) + \tilde{y}_{0i}] \text{sign } u_{1i}. \end{aligned}$$

Рассмотрим далее случаи, когда $u_{1i} = -u_{2i}$, т. е. когда $|u_{1i}| = |u_{2i}| = 1$, а знаки $\text{sign } u_{1i} = -\text{sign } u_{2i}$. В данном случае уравнения (4) принимают следующий вид:

$$\begin{cases} \tau_{1i} - (1-\tau_{2i}) = [\tilde{\omega}_{ki}(1) - \tilde{\omega}_{0i}] \text{sign } u_{1i} \\ (\tau_{1i} - \frac{\tau_{1i}^2}{2}) - [\frac{1}{2} - (\tau_{2i} - \frac{\tau_{2i}^2}{2})] = [\tilde{y}_{ki}(1) - \tilde{y}_{0i} - \tilde{\omega}_{0i}] \text{sign } u_{1i}. \end{cases}$$

Полученная система уравнений имеет следующее решение:

$$\tau_{1i} = \frac{1}{2} \left(1 - q_{1i} - \sqrt{2(1 - q_{2i}) - (1 - q_{1i})^2} \right); \quad \tau_{2i} = \frac{1}{2} \left(1 - q_{1i} + \sqrt{2(1 - q_{2i}) - (1 - q_{1i})^2} \right),$$

где

$$q_{1i} = -p_{1i}; \quad q_{2i} = -p_{2i}.$$

Знаки управляющих функций u_{1i} , входящие в приведенные выше решения, определим по знакам соответствующих импульсов управления ΔV_{1i} , так что $\text{sign } u_{1i} = \text{sign } \Delta V_{1i}$, где $\Delta V_{1i} = \tilde{y}_{k_i}(1) - \tilde{y}_{0i} - \tilde{\omega}_{0i}$.

По известным нормированным параметрам τ_{1i} и τ_{2i} находим соответствующие значения моментов времени окончания первого t_{1i} и начало второго t_{2i} участков работы двигателей ориентации по каждому каналу:

$$\begin{aligned} t_{1i} &= \Delta T \cdot \tau_{1i}; \\ t_{2i} &= \Delta T \cdot \tau_{2i}, \end{aligned} \quad i = 1, 2, 3.$$

Область существования решения определяется требованием упорядоченного расположения параметров τ_{1i} и τ_{2i} в пределах временного интервала стабилизации:

$$0 < \tau_1 < \tau_2 < 1.$$

Алгоритмы такого типа работоспособны при достаточно больших возмущающих моментах и при значительных рассогласованиях по начальной угловой скорости.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для подтверждения работоспособности приведенного выше алгоритма были проведены численные исследования. При решении задачи стабилизации рассматривались следующие возмущающие факторы:

- погрешности измерения углов Эйлера – 15 угл.с;
- погрешности измерения угловой скорости – 0.01 град/ч;
- погрешности управляющего ускорения – 5 %.

Дополнительными возмущениями являются изменения моментов инерции δI_i (порядка 5 %), которые возникают из-за изменения массы МКА.

На рис. 5–8 приведены рассогласования Δ_i между $\bar{p}_{\text{расч}}$ и $\bar{p}_{\text{ипр}}$ на каждом участке стабилизации. На рис. 9, 10 представлено отклонение расчетных значений углов рыскания ψ и тангажа ϑ от их программных значений.

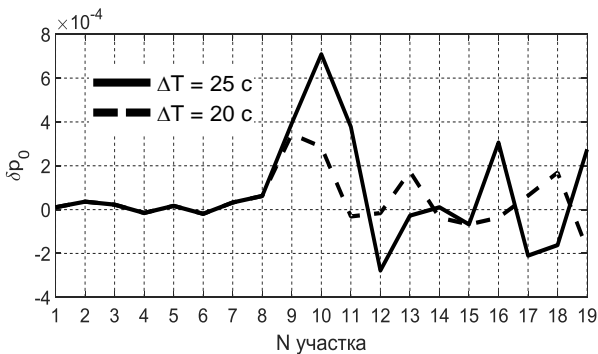


Рис. 5. Отклонение $p_{0\text{расч}}$ от $p_{0\text{ипр}}$

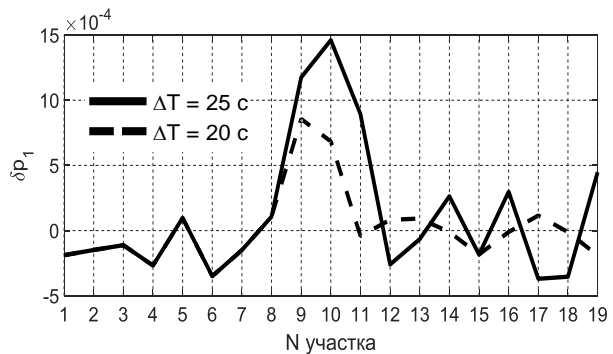


Рис. 6. Отклонение $p_{1\text{расч}}$ от $p_{1\text{ипр}}$

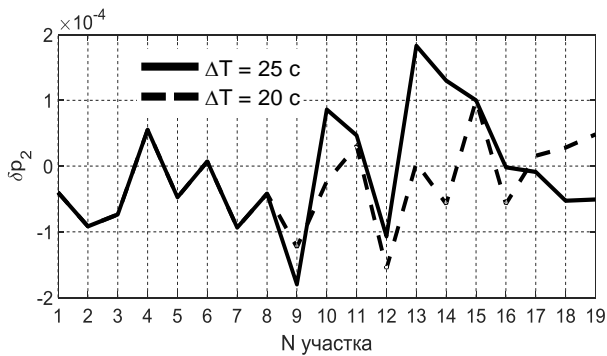


Рис. 7. Отклонение $p_{2\text{расч}}$ от $p_{2\text{пр}}$

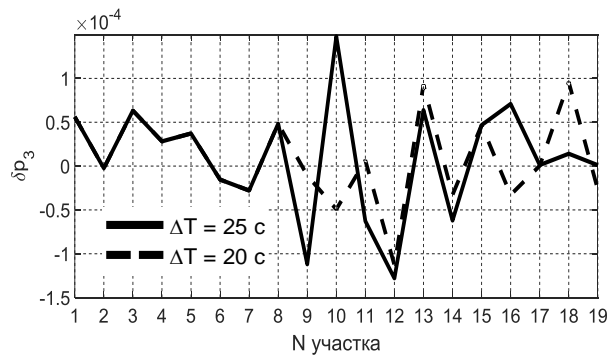


Рис. 8. Отклонение $p_{3\text{расч}}$ от $p_{3\text{пр}}$

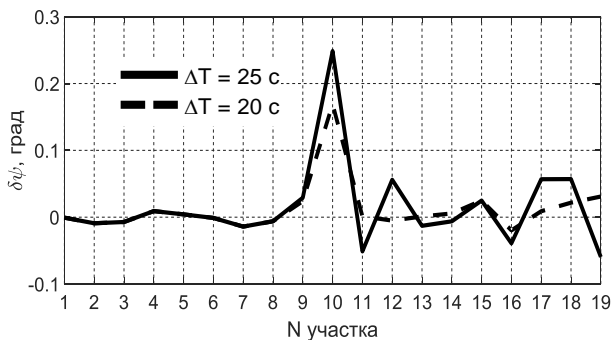


Рис. 9. Отклонение $\psi_{\text{расч}}$ от $\psi_{\text{пр}}$

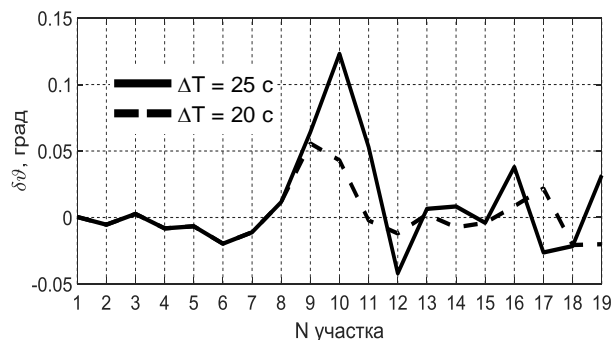


Рис. 10. Отклонение $\vartheta_{\text{расч}}$ от $\vartheta_{\text{пр}}$

Длительность временных интервалов ΔT , на которых решалась задача стабилизации, равна 25 с. Для повышения точности необходимо уменьшать интервал времени стабилизации, поэтому расчеты дополнительно проводились с длительностью 20 с.

Численное моделирование процесса стабилизации динамически несимметричного КА, проведенное с учетом возмущений по управляющим моментам, моментам инерции, навигационным ошибкам определения векторов кинематических параметров и угловой скорости, показало следующее:

- для повышения точности угловой стабилизации в области повышенных отклонений необходимо уменьшать интервал дискретизации ΔT ;
- сравнительные расчеты показали, что уменьшение ΔT на 20 % позволяет снизить максимальные значения угловых отклонений от программных значений приблизительно в 2,5 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен алгоритм стабилизации МКА при решении задач наблюдения за ОО, отличающийся от известных тем, что позволяет реализовать управление угловым движением по трем осям одновременно с двумя участками включения управляющего реактивного двигателя в условиях действия возмущающих факторов. В качественном отношении алгоритмы управления, имеющие два участка включения УРД, обеспечивают более устойчивый процесс стабилизации, поскольку на каждом шаге сводится к нулю не только рассогласование по угловым параметрам, но и рассогласование по угловой скорости. В принятых расчетах алгоритм стабилизации МКА при решении задач наблюдения за ОО позволяет повысить точность сопровождения ОО в 1,5–2 раза по сравнению с алгоритмом, в котором учитывается только требование по кинематическим параметрам в конце интервалов стабилизации.

Подведя итог, можно заключить, что алгоритм обеспечивает получение решений, оптимальных по расходу рабочего тела УРД, и решить задачу стабилизации по траекториям свободного движения.

Список используемых источников

1. *Калиткин Н.Н., Альшина Е.А.* Численные методы. – М.: Академия, 2013. – 304 с.
2. *Миронов В.И., Миронов Ю.В., Юсупов Р.М.* Синтез итерационных алгоритмов решения краевых задач и нелинейных уравнений // Известия вузов. Приборостроение. – 2010. – Т. 53, № 1. – С. 9–15.
3. *Миронов В.И., Зоткин М.Ю., Шушаков А.О.* Алгоритм терминальной многошаговой стабилизации сервисного космического аппарата при угловом сопровождении орбитального объекта с одним участком включения управляющего реактивного двигателя // Труды ВКА имени А.Ф. Можайского. – 2020. – Вып. 672. – С. 299–306.
4. *Охоцимский Д.Е., Голубев Ю.Ф., Сихарулидзе Ю.Г.* Алгоритмы управления космическим аппаратом при входе в атмосферу. – М.: Наука, 1975. – 400 с.
5. *Силантьев С.Б.* Системы навигации и ориентации космических аппаратов. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2007. – 155 с.

С.С. Ивашков
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского
и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ПОЛЕТА ИСТРЕБИТЕЛЯ-БОМБАРДИРОВЩИКА ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ОГРАНИЧИТЕЛЯ ПРЕДЕЛЬНЫХ РЕЖИМОВ

В статье обоснована необходимость создания имитационных моделей полета самолетов. Представлена имитационная модель полета истребителя-бомбардировщика, учитывающая особенности функционирования механического ограничителя предельных режимов, позволяющая проводить исследования в области оценки эффективности его работы. Описаны основные блоки модели. Представлены результаты имитационного моделирования с использованием разработанной математической модели.

Ключевые слова: математическая модель, MATLAB&Simulink, ограничитель предельных режимов, пилотажный стенд, имитационное моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность применения авиационной техники неразрывно связана с проблемой безопасности полетов. Мировая статистика летной эксплуатации самолетов свидетельствует о том, что более половины авиационных аварий и катастроф происходит по причине человеческого фактора [1]. В ряде случаев действия летчика приводят к выходу параметров движения самолета за установленные ограничения. Одним из решений этой проблемы стало применение на современных самолетах ограничителей предельных режимов (ОПР).

ОПР, используемые для обеспечения безопасности полета в режиме ручного управления, основаны либо на непосредственном воздействии на ручку управления самолетом (РУС) при приближении ограничиваемого параметра к допустимому значению, либо на ограничении сигналов, поступающих в исполнительную часть системы, с помощью определенных законов управления. На истребителе-бомбардировщике Су-34 применяется ОПР первого типа. Он включает в себя дополнительно подключаемый пружинный загрузочный элемент, воспринимаемый летчиком как «упор» на РУС по тангажу, и генератор тряски, реализующий тактильную сигнализацию. При этом, летчику предписывается пилотировать «по границе срабатывания ОПР», т. е. он вынужден «доверять» ограничителю, полностью полагаясь на его эффективность. Однако, летные испытания и эксплуатация самолета показывают, что такой ОПР фактически не решает предписанной ему задачи в полном объеме, что снижает уровень безопасности полета.

Для примера на рис. 1 представлена сигналограмма, характеризующая изменение ряда кинематических параметров по времени при выполнении самолетом Су-34 маневра «вираж-спираль». Анализ сигналограммы показывает, что даже при пилотировании «по границе срабатывания ОПР» (пилообразные сигналы X_B и $X_{орг}$) и вращении по крену, происходит «заброс» угла атаки выше предельно допустимого значения.

Следовательно, задача по оценке эффективности работы ОПР представляется весьма актуальной. На практике эта задача решается в процессе летных испытаний. Однако используемые испытательные режимы зачастую приводят к попаданию в опасные режимы полета («сваливание», «штопор» и т. д.), что представляется недопустимым. Обеспечить безопасность испытаний, при этом снизив затраты (как материальные, так и временные) на их проведение, возможно при комплексном подходе: получении основных результатов посредством

имитационного моделирования на пилотажном стенде с участием летчиков во всем исследуемом диапазоне высот и скоростей, и их проверки в летных испытаниях в нескольких контрольных точках.

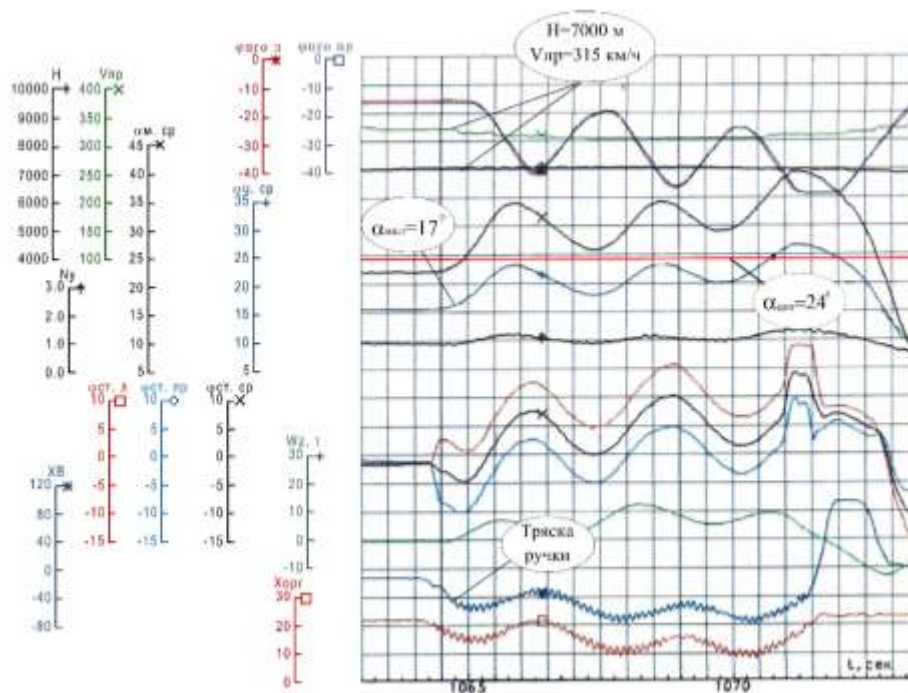


Рис. 1. Сигналограмма изменения кинематических параметров при выполнении маневра «вираж-спираль»

Важную роль в таком подходе играют адекватные и достоверные математические модели полета исследуемого самолета. Также необходимо иметь устройства, способные имитировать работу ограничителей предельных режимов. К таким устройствам можно отнести электромеханические загрузчики MOOG Fokker (рис. 2), которые обеспечивают обратную связь по усилиям, имитацию «тряски» с различной амплитудой и частотой колебаний, а также механический упор.

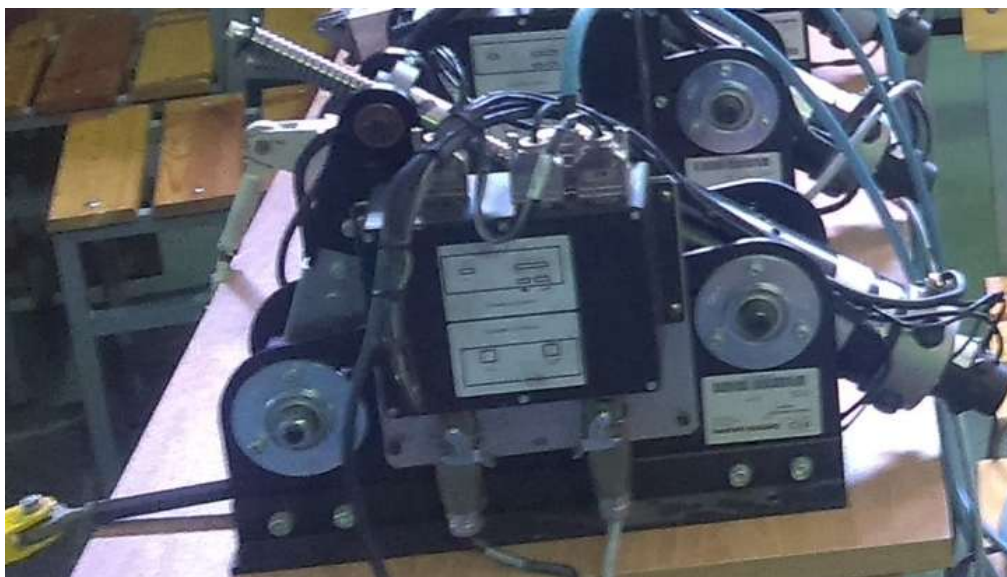


Рис. 2. Электромеханический загрузчик MOOG Fokker

ОПИСАНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПОЛЕТА САМОЛЕТА Су-34

Математическая модель полета самолета Су-34, структурная схема которой показана на рис. 3, создана с использованием программного продукта MATLAB&Simulink. Она структурно состоит из следующих блоков:

- блок уравнений динамики полета самолета;
- блок аэродинамических характеристик самолета;
- блок системы управления;
- блок ОНР;
- блок командных рычагов управления (КРУ).



Рис. 3. Структурная схема модели полета самолета Су-34

В блоке уравнений динамики полета самолета решается система дифференциальных уравнений движения центра масс самолета в проекциях на оси связанной системы координат [2]:

$$\begin{aligned}
 m \left(\frac{dV_x}{dt} + \omega_y V_z - \omega_z V_y \right) &= P \cos \phi_p - X_a \cos \alpha \cos \beta + Y_a \sin \alpha - Z_a \cos \alpha \sin \beta - mg \sin \vartheta; \\
 m \left(\frac{dV_y}{dt} + \omega_z V_x - \omega_x V_z \right) &= P \sin \phi_p + X_a \sin \alpha \cos \beta + Y_a \cos \alpha + Z_a \sin \alpha \sin \beta - mg \cos \vartheta \sin \gamma; \\
 m \left(\frac{dV_z}{dt} + \omega_x V_y - \omega_y V_x \right) &= -X_a \sin \beta + Z_a \cos \beta + mg \cos \vartheta \sin \gamma; \\
 \frac{dX_g}{dt} &= V_x \cos \vartheta \cos \psi + V_y (\sin \gamma \sin \psi - \cos \gamma \sin \vartheta \cos \psi) + V_z (\cos \gamma \sin \psi + \sin \gamma \sin \vartheta \cos \psi); \\
 \frac{dH}{dt} &= V_x \sin \vartheta + V_y \cos \vartheta \cos \gamma - V_z \cos \vartheta \sin \gamma; \\
 \frac{dZ_g}{dt} &= -V_x \cos \vartheta \sin \psi + V_y (\sin \gamma \cos \psi + \cos \gamma \sin \vartheta \sin \psi) + V_z (\cos \gamma \cos \psi - \sin \gamma \sin \vartheta \sin \psi);
 \end{aligned} \tag{1}$$

Все обозначения, используемые в формульных зависимостях, представлены в ГОСТ 20058-80. Составные компоненты угловой скорости определяются решением уравнений моментов:

$$\begin{aligned}
 I_x \frac{d\omega_x}{dt} - I_{xy} \frac{d\omega_y}{dt} + (I_z - I_y) \omega_y \omega_z + I_{xy} \omega_x \omega_y &= M_x; \\
 I_y \frac{d\omega_y}{dt} - I_{xy} \frac{d\omega_x}{dt} + (I_x - I_z) \omega_x \omega_z - I_{xy} \omega_y \omega_z &= M_y; \\
 I_z \frac{d\omega_z}{dt} + (I_y - I_x) \omega_x \omega_y - I_{xy} (\omega_x^2 - \omega_y^2) &= M_z.
 \end{aligned} \tag{2}$$

Система дифференциальных уравнений относительно эйлеровых углов получается, если разрешить кинематические уравнения Эйлера относительно компонентов угловой скорости:

$$\begin{aligned}\frac{d\vartheta}{dt} &= \omega_y \sin \gamma + \omega_z \cos \gamma; \\ \frac{d\gamma}{dt} &= \omega_x - (\omega_y \cos \gamma - \omega_z \sin \gamma) \operatorname{tg} \vartheta; \\ \frac{d\psi}{dt} &= \frac{1}{\cos \vartheta} (\omega_y \cos \gamma - \omega_z \sin \gamma).\end{aligned}\quad (3)$$

Также модель полета самолета учитывает изменение его массы ввиду секундного расхода топлива в зависимости от режима работы двигателя:

$$\frac{dm}{dt} = -q_c, \quad (4)$$

Аэродинамические углы атаки и скольжения определяются по формулам:

$$\begin{aligned}\beta &= \arcsin \left(\frac{V_z}{V} \right); \\ \alpha &= \begin{cases} -\arcsin \left(\frac{V_y}{\sqrt{V_x^2 + V_y^2}} \right), & \text{если } V_x \geq 0; \\ \left[-\pi + \arcsin \left(\frac{|V_y|}{\sqrt{V_x^2 + V_y^2}} \right) \right] \operatorname{sgn}(V_x) & \text{если } V_x \leq 0; \end{cases}\end{aligned}\quad (5)$$

где $V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$.

Для решения систем уравнений 1–5 необходимо задать начальные условия: $V_x(0)$, $V_y(0)$, $V_z(0)$, $X_g(0)$, $H(0)$, $Z_g(0)$, $\omega_x(0)$, $\omega_y(0)$, $\omega_z(0)$, $\vartheta(0)$, $\gamma(0)$, $\psi(0)$, $m(0)$, $\alpha(0)$, $\beta(0)$.

Блок аэродинамических характеристик самолета создан в соответствии с банком аэродинамических данных. Аэродинамические характеристики самолета Су-34 в продольном канале представлены в виде коэффициентов продольной и нормальной сил и момента тангажа в зависимости от угла атаки α , числа M и углов отклонения органов управления. В боковом канале – в виде производных боковой силы и боковых моментов рыскания и крена по углу скольжения, угловым скоростям и углам отклонения органов управления при различных углах атаки α и числах M . Зависимости представлены в связанной системе координат.

Блок системы управления создан на основе схем продольного и бокового каналов системы дистанционного управления Су-34 (СДУ-10В), а также на основе сведений о конструктивных особенностях поперечного и путевого каналов управления с соответствующими механическими элементами.

Модель СДУ в продольном канале представлена на рис. 4. Отличительной особенностью модели является отсутствие фильтра упругих колебаний сигнала угловой скорости ω_z , поскольку модель самолета не обладает свойством упругости. Сигнал на дифференциальное отклонение стабилизатора не подается в продольный канал, а подается непосредственно в блок аэродинамических характеристик.

Модель СДУ бокового канала представлена на рис. 5. На самолете Су-34 управление флаперонами и рулями направления обеспечивается механической проводкой управления. С помощью кинематических механизмов обеспечивается одновременная отработка сигналов рулевыми плоскостями от СДУ и органов управления самолетом. В модели кинематические механизмы реализованы как сумматоры, складывающие сигналы от СДУ и органов управления.

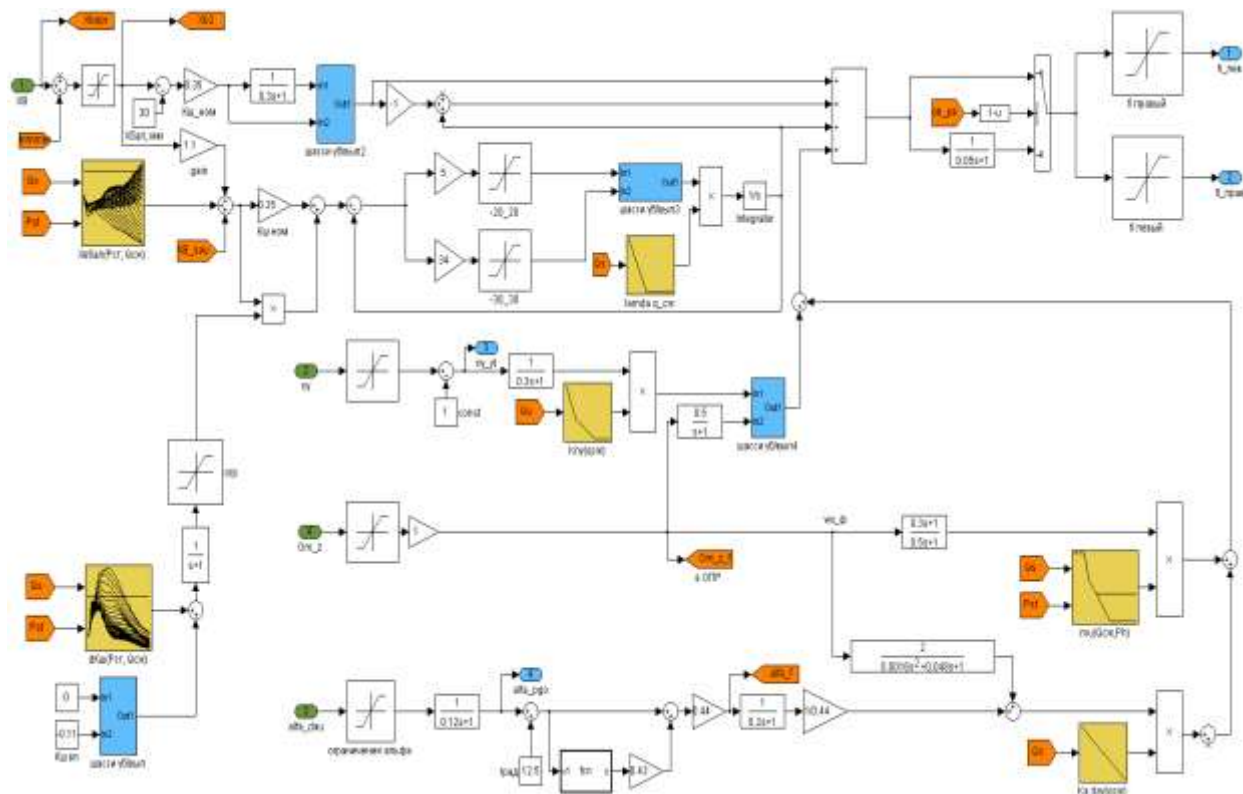


Рис. 4. Модель СДУ в продольном канале

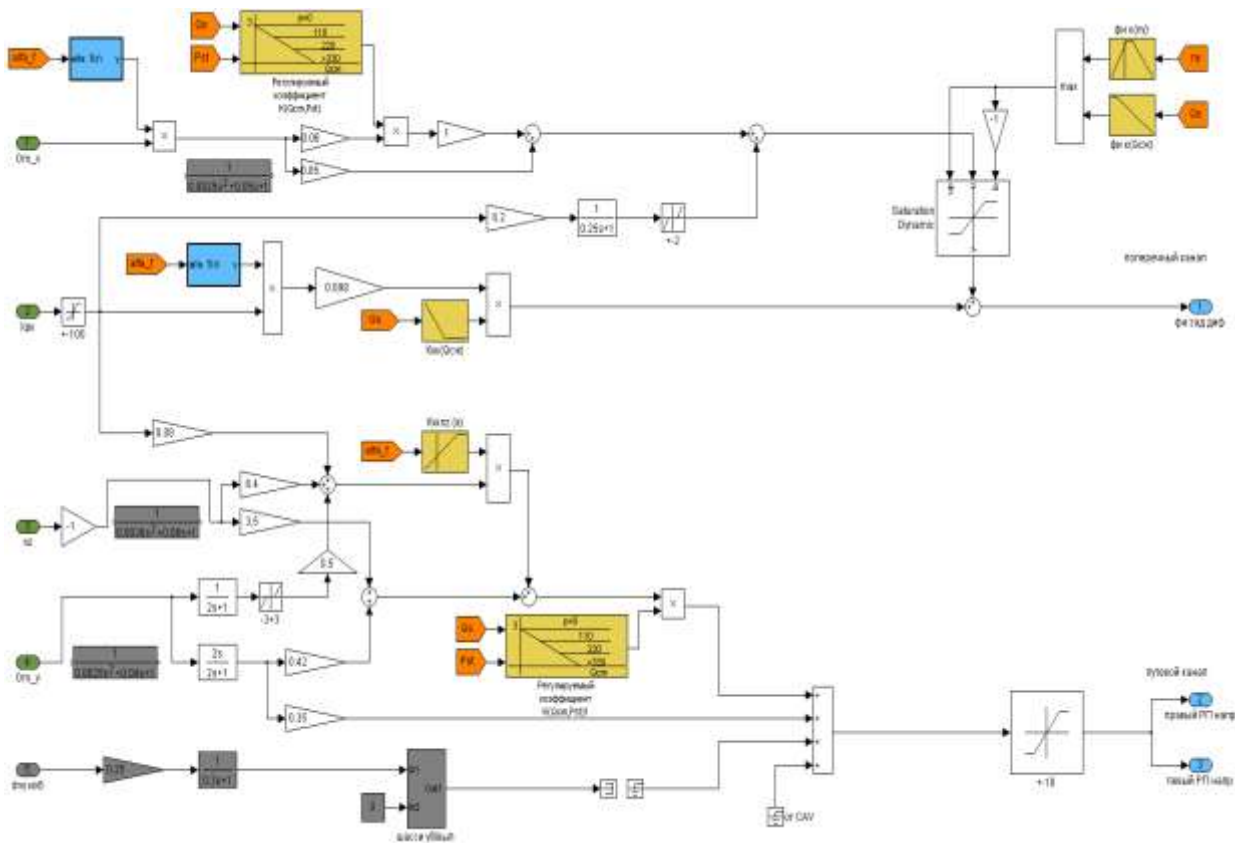


Рис. 5. Модель СДУ бокового канала

В модели управление флаперонами осуществляется разделением управляющего сигнала на продольный и боковой каналы. В продольный канал модели аэродинамики поступает сигнал из блока модели канала флаперонов на синхронный выпуск закрылков во взлетно-посадочном или маневренном режиме, а в боковой канал подается сигнал от органа управления по крену на дифференциальное отклонение флаперонов через звено усиления.

Управление рулями направления осуществляется суммированием сигналов из блока системы управления бокового канала и сигналом от педалей. Сигнал от педалей преобразуется в угол отклонения рулей направления через звено усиления. Суммированный сигнал подается в блок аэродинамических характеристик бокового канала через ограничитель отклонения рулей направления.

Работа переднего горизонтального оперения (ПГО), носков и флаперонов обеспечивается в автоматическом режиме. Канал ПГО включается в работу при отсутствии сигнала обжатия передней опоры. По сигналу превышения числа M и скоростного напора q , ПГО устанавливается в положение $-2,5^\circ$ с заданным темпом по аperiodическому закону. ПГО подключается к работе с таким же темпом и законом, но с гистерезисом по числу M и скоростному напору q .

Канал носков обеспечивает выпуск и уборку носков в зависимости от угла атаки в диапазоне $-4^\circ \dots -30^\circ$, а также отключение канала с заданным темпом при превышении заданного значения числа M и скоростного напора q и при обжатии передней стойки и его подключение с гистерезисом.

Канал флаперонов обеспечивает в полетной конфигурации выпуск флаперонов как закрылков на угол до 5° для улучшения маневренных характеристик. Отключение канала происходит по сигналу выпуска закрылков, а также при превышении заданных числа M и скоростного напора q . Отключение происходит с заданным темпом по аperiodическому закону. По скоростному напору q происходит подключение и отключение канала с заданным гистерезисом.

Блок ОПР создан на основе структурной схемы аналогового контура ОПР самолета Су-34, представленной на рис. 6.

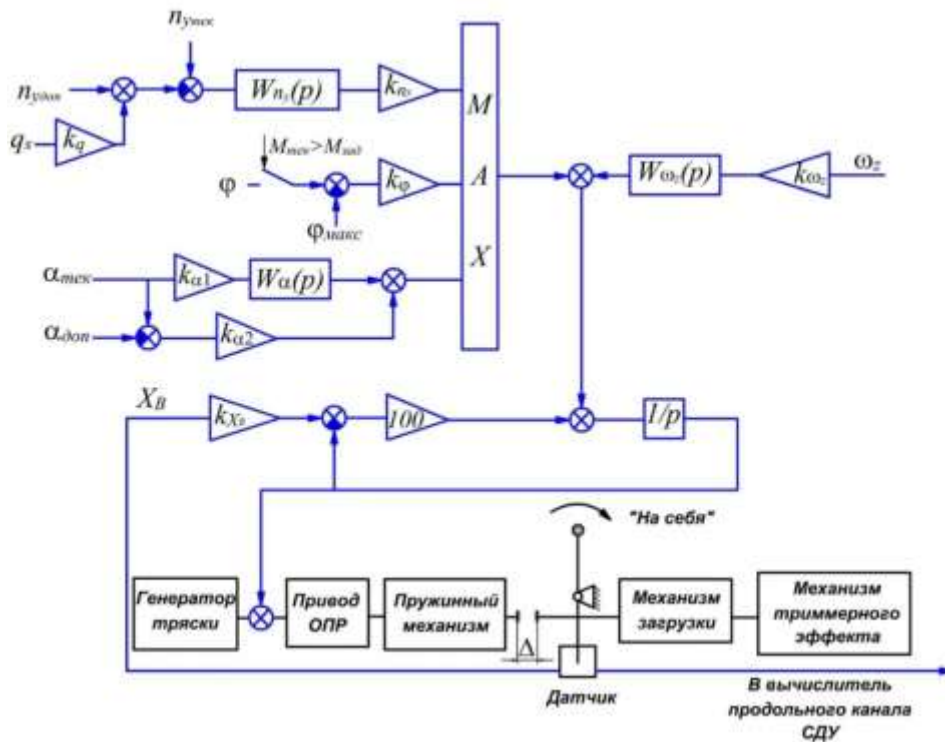


Рис. 6. Структурная схема аналогового контура ОПР

На рисунке обозначены:

X_B – сигнал отклонения РУС в канале тангажа;

$n_{y \text{ тек}}$ – сигнал текущей нормальной перегрузки;

$\alpha_{\text{тек}}$ – сигнал текущего угла атаки;

$n_{y \text{ доп}}$ – предельно допустимое значение нормальной перегрузки;

$\alpha_{\text{доп}}$ – предельно допустимое значение угла атаки;

ω_z – скорость тангажа;

φ – угол отклонения стабилизатора;

$\varphi_{\text{макс}}$ – максимальный угол отклонения стабилизатора на кабрирование;

q_s – сжимаемый скоростной напор;

$k_n, k_\alpha, k_{\omega_z}, k_\varphi, k_q$ – коэффициенты усиления;

k_{X_B} – масштабный коэффициент передачи по сигналу от РУС;

$W_{n_y}(p), W_{\omega_z}(p), W_\alpha(p)$ – фильтры;

Δ – зазор между элементами РУС и штоком рулевой машины ОНР.

Ограничитель содержит решающую схему, следящий привод, исполнительным агрегатом которого служит рулевая машина, пружинный механизм и генератор тряски. Остальные элементы, показанные на схеме, являются принадлежностью алгоритма системы дистанционного управления самолета.

Для формирования тактильного ощущения, характерного для «срывного бафтинга», к приводу ОНР «приходит» дополнительный сигнал от генератора тряски. Этот сигнал обеспечивает знакопеременное перемещение штока привода с частотой около 8 Гц.

Simulink-модель ОНР представлена на рис. 7. Формируемый сигнал срабатывания ОНР передается в блок КРУ, где, в зависимости от значения этого сигнала, включается «тряска» ручки или механический упор.

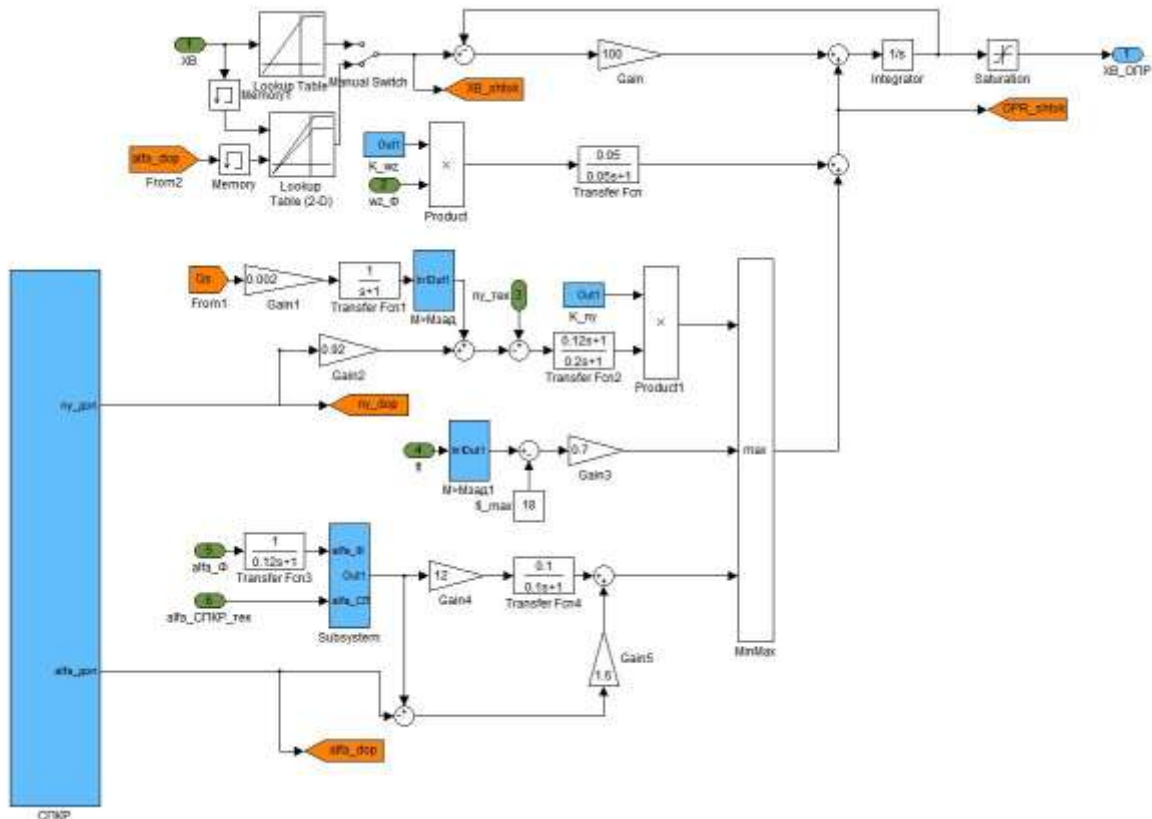


Рис. 7. Simulink-модель ОНР

Блок КРУ состоит из двух модулей. Первый модуль предназначен для преобразования аналоговых сигналов с ручек управления двигателями и педалей в цифровые и передачи их в модель полета самолета. Второй модуль предназначен для формирования сигналов перемещения ручки управления самолетом, осуществления ее загрузки, согласно загрузочной диаграмме, а также имитации срабатывания ОНР (включение «тряски» или механического упора). Основным элементом второго модуля является электромеханический загрузчик (см. рис. 2). Подробный процесс настройки, принцип работы и состав элемента описан в [3]. Связь электромеханических загрузчиков с математической моделью обеспечивает блок сопряжения с цифровым вычислителем загрузчиков (рис. 8).

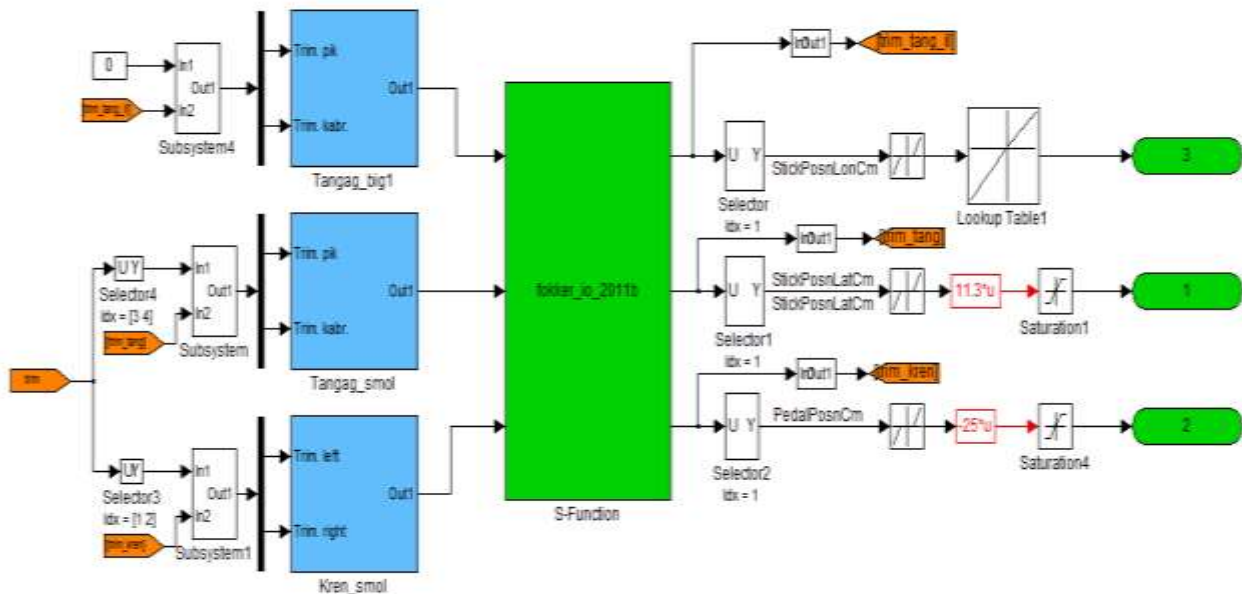


Рис. 8. Блок сопряжения с цифровым вычислителем

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО РЕЖИМА «ДИАГОНАЛЬНАЯ ДАЧА РУЧКИ»

Созданная имитационная модель полета самолета Су-34 позволяет проводить исследования динамики полета на околоритических и критических режимах полета, с целью оценки эффективности работы штатного ОНР. Для достижения этой цели был выбран испытательный режим «Диагональная дача ручки». Этот режим проводят с целью оценки эффективности работы ОНР при одновременном энергичном вращении по крену и тангажу, так как при таком движении наиболее ярко проявляется инерционное взаимодействие продольного и бокового каналов, что приводит к «подхвату» по углу атаки [4]. В проведении моделирования приняли участие летчики, имеющие опыт эксплуатации истребителя-бомбардировщика с механическим ОНР.

На рис. 9 представлены результаты моделирования испытательного режима «Диагональная дача ручки», полученные с использованием разработанной модели. Из графиков видно, что на 16-й секунде полета на высоте 1000 м и скорости полета 350 км/ч летчиком была выполнена диагональная дача ручки. При одновременном вращении в продольном и поперечном канале возник «подхват» по углу атаки, что привело к превышению допустимого значения $\alpha_{\text{доп}} = 24^\circ$. Угол атаки достиг значения $\alpha = 35^\circ$, а самолет вышел на режим «сваливания».

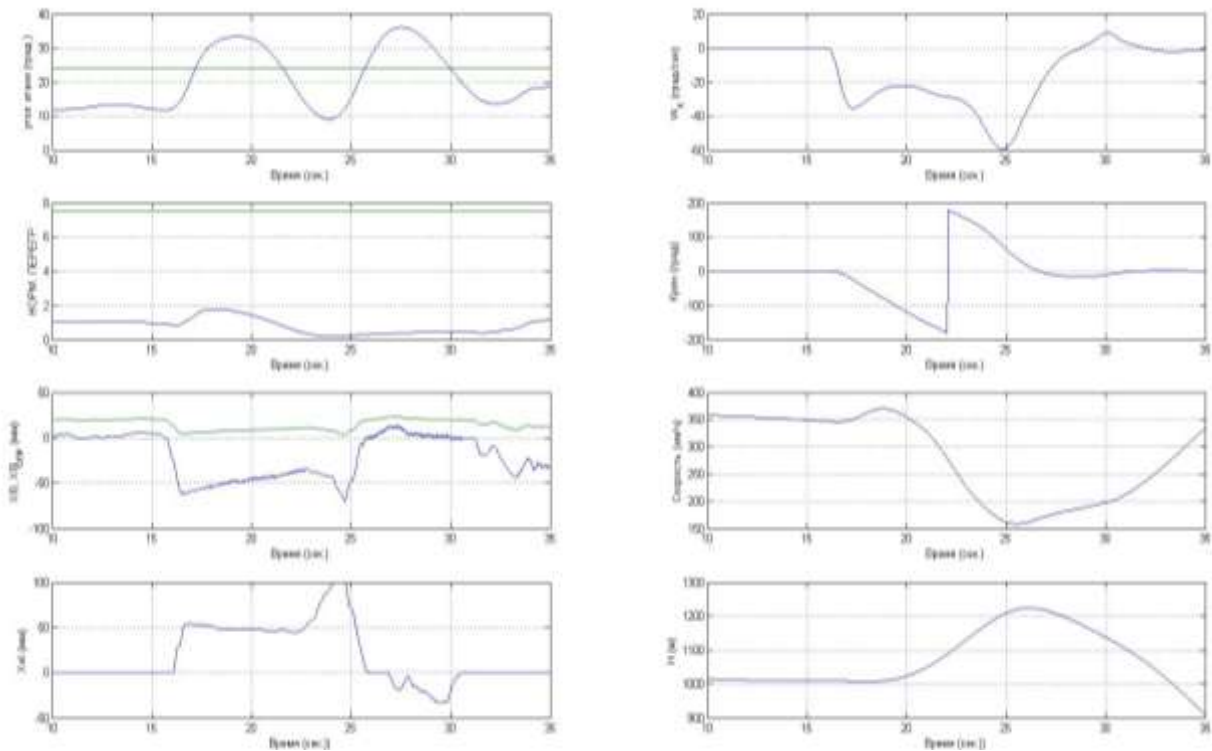


Рис. 9. Результаты моделирования испытательного режима «Диагональная дача ручки»

Полученные результаты показали, что штатный ограничитель предельных режимов самолета Су-34 малоэффективен при полете в условии инерционного взаимодействия продольного и бокового каналов. Этот факт также подтверждается и летными испытаниями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение имитационного моделирования в процессе научно-методического сопровождения летных испытаний позволяет повысить их информативность и безопасность, а также сократить материальные и временные затраты.

Рассмотренная в статье имитационная модель истребителя-бомбардировщика позволяет проводить исследования в области оценки эффективности работы ограничителя предельных режимов. От известных модель отличается тем, что в ней учитываются особенности работы механического ОПР, заключающиеся в имитации «тряски» РУС и механическом упоре РУС с помощью электромеханического загрузителя. Модель является составной частью пилотажного стенда, который позволяет проводить полунатурное моделирование с участием летчиков.

Результаты моделирования показывают, что штатный механический ОПР недостаточно эффективен в условии инерционного взаимодействия продольного и бокового каналов. Возможно решение этой проблемы следует искать в применении астатических алгоритмов [5].

Список используемых источников

1. *Верешиков Д.В., Николаев С.В., Разуваев Д.В.* Системы управления летательных аппаратов: учебник. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2018. – 322 с.

2. Динамика полета: учебник для студентов высших учебных заведений / А.В. Ефремов [и др.]; под ред. Г.С. Бюшгенса. – М.: Машиностроение–Полет, 2017. – 776 с.
3. Методика применения системы электромеханической загрузки командных рычагов управления для полунатурного моделирования динамики полета самолетов на пилотажных стендах: научно-технический отчет о НИР / Д.В. Верещиков [и др.]. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2019. – 67 с.
4. *Бюшгенс Г.С., Студнев Р.В.* Аэродинамика самолета: Динамика продольного и бокового движения. – М.: Машиностроение, 1979. – 352 с.
5. Аэродинамика, устойчивость и управляемости сверхзвуковых самолетов / под ред. Г.С. Бюшгенса. – М.: Наука. Физматлит, 1998. – 816 с.

Б.Д. Казахов,
доктор военных наук, профессор;
В.В. Козлов,
доктор технических наук, профессор;
А.В. Лагун,
кандидат технических наук, доцент

МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ УРОВНЯ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНЕГО ДЕСТРУКТИВНОГО ФАКТОРА НА БЕЗОПАСНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ СЛОЖНОГО ГРУППОВОГО ОБЪЕКТА

Проведены исследования оценки безопасной эксплуатации сложного группового объекта, возможности нанесения ущерба и деструктивного воздействия функционированию комплексов внешними деструктивными факторами. Определены показатели безопасной эксплуатации комплекса в случае деструктивного воздействия, а также разработана методика оценивания уровня безопасной эксплуатации комплекса при возможных деструктивных воздействиях. С помощью данной методики оценена возможность выбора эффективного облика системы, обеспечивающей безопасную эксплуатацию сложного группового объекта, и решения задачи обеспечения безопасной эксплуатации сложных групповых объектов при воздействии на них внешних деструктивных воздействий без привлечения дополнительных сил и структур.

Ключевые слова: сложный групповой объект, структурный элемент, показатель, система, обеспечивающая безопасную эксплуатацию, деструктивное воздействие.

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях успешность функционирования сложных стационарных технических комплексов во многом определяется степенью их защищенности от влияния различных (искусственного и природного происхождения) негативных факторов. Применительно к сложным групповым объектам (СГО) как к комплексу зданий и сооружений озвученное положение охватывает проблему их защиты от внешнего деструктивного воздействия (ДВ).

При выборе показателей, характеризующих процессы функционирования системы защиты (СЗ) СГО и действий средств, наносящих ему деструктивное воздействие, надлежит учитывать следующие допущения:

1) совокупность данных безразмерных показателей должна позволять оценивать возможность безопасной эксплуатации СГО при воздействии на него деструктивных факторов, исходя из уровня его защищенности СГО от них;

2) анализируемые показатели должны быть представлены в единой метрике, несмотря на то что они описывают противоположные процессы.

Руководство перечисленными выше допущениями приводит к выводу о необходимости использования нами методологии внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремленных систем для определения показателей объекта [1].

При решении рассматриваемой задачи каждый показатель должен быть построен на основании сравнения двух результатов в каждой операции (деструктивного воздействия и защиты).

Сравнение последствий каждой операции требует формирования показателей требуемого ($Y_{тр}$) и реального (Y_p) результатов. В этом случае итог каждой операции может быть определен через показатель защищенности СГО — $P^{заш}$ и показатель деструктивного воздействия на СГО — $P^{дв}$ при сравнении требуемого и реального результатов:

$$P^{заш} = f(Y_{тр}^{заш}, Y_p^{заш}), \quad P^{дв} = f(Y_{тр}^{дв}, Y_p^{дв}),$$

В свою очередь каждый показатель операции определяется через группу результирующих факторов, к которым относятся полезный эффект (q), затраченные ресурсы (R) и сроки ее выполнения (T).

Результат операции описывается функцией от результирующих факторов:

$$Y=f(q,R,T).$$

Для получения численного значения показателя операции и выполнения процедуры оценивания защищенности СГО, необходимо [2]:

- установить вид функций результата $Y(Y_{\text{тр}})$, при этом надлежит ввести понятие требуемого результата $Y_{\text{тр}}$;
- установить вид функции соответствия или выражение для расчета функции показателя, который также неизвестен;
- определить эффективную стратегию $S_{\text{эф}}$;
- выявить и формализовать полезный эффект E ;
- формализовать и агрегировать выражения для оценивания всех видов расходуемых ресурсов $R_{\text{расх}}$.

Для того, чтобы решать задачи оценивания выбора варианта защиты СГО, необходимо опираться на конкретные показатели. Здесь появляется еще одна проблема – отсутствие таких показателей как по объективным, так и по субъективным причинам. Поэтому в условиях нечеткого и неполного набора существующих показателей необходим алгоритм получения таких интегральных показателей, которые обладали бы необходимой содержательностью, интерпретируемостью, изменяемостью, чтобы существование или появление неизвестных сегодня свойств не изменило выражения для показателя защищенности. С этой целью необходимо агрегировать известные на сегодня показатели и выявить для них наиболее общее свойство.

Такая процедура должна привести к формированию следующих групп:

- показателей целевой эффективности;
- показателей ресурсопотребляемости;
- показателей оперативности.

Данные показатели могут быть выражены в следующих формах:

- четкие показатели (с конкретным стоимостным или физическим содержанием);
- нечеткие показатели (характеризующие качество объекта через результаты каких либо исследований, например экспертных).

Возможность агрегирования показателей лишь частично снижает остроту проблемы. При формировании показателей для СГО возникает проблема, связанная с определением зависимостей для выражения общих показателей через частные показатели. Для разрешения этой проблемы удобнее использовать скалярное представление частных показателей, которое носит название «сверстка». При этом необходимо выбрать одну из известных сверсток параметров.

Первой задачей в процессе определения выражения для этих функций является получение полного набора параметров, определяющих функцию результата (Y). Для решения этой задачи допустимо использовать морфологический анализ требований, изложенных в нормативных документах.

МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СВОЙСТВ ОБЪЕКТА

Морфологический анализ исследуемого свойства объекта позволяет агрегировать особенности его функционирования в систему независимых параметров, а также, в случае необходимости, пополнить данную систему недостающей информацией. Система простых свойств (S_a) описывает соответствующие свойства СЗ или ДВ как целостных объектов (A). В общем случае система простых свойств (S_a) различна. Каждое свойство СЗ или ДВ выступает как

исходное понятие, а система S_a , описывающая его, как производное [3]. Элементы системы S_a задаются в виде некоторой совокупности декомпозиций понятий и определений:

$$\check{D}AdR_k = \Sigma a(R_k).$$

Здесь \check{D} – знак операции декомпозиции, которая применяется к свойству комплекса A k раз;
 d – знак операции достижения этого свойства;
 R_k – отношение, по которому проводится операция достижения соответствующего свойства:

$$R_k \subset \{R_k\},$$

где $\{R_k\}$ – совокупность отношений некоторого уровня отношений $U_A(R_k)$, при котором явным образом задается описание значений системы S_a ;

$\Sigma a(R_k)$ – совокупность свойств, объединенных в свойстве комплекса A , входящих в состав соотношения $R_k \subset \{R_k\}$ и обладающих признаками, отражающими эти отношения.

Система S_a задается композицией выделенных свойств и их показателей:

$$S_a = \check{C}(\Sigma a(R_k))dK_a,$$

где \check{C} – знак операции композиции;

K_a – константа системы S_a отражающая системообразующее отношение и являющаяся постоянным отношением для любых значений S_a .

По мере накопления информации о свойствах СЗ и ДВ формируется уровень отношений $U_a(R_k)$. Он упорядочен определенным образом последовательностью отношений $\{R_k\}$, с помощью которых может быть описан любой из членов последовательности $\{S_{a_j}^0\}$.

Когда число элементов данной последовательности j увеличивается от 1 до n , для исследуемого комплекса выделяется центральная информация $I_{ц}$ и периферийная информация каждого значения $S_{a_j}^0$.

Центральная информация $I_{ц}$ для исследуемого комплекса может быть выражена в следующем виде:

$$I_{ц} = \check{C}(\check{D}AdS_{(n-1,n)}^0)dK_A, \quad \text{где } S_{(n-1,n)}^0 = \check{C}(\check{D}AdS_{(n-2,n-1)}^0)dK_A.$$

Причем центральная информация $I_{ц}$ при $n=1$ принимает значение $I_{ц} = S_{a1}^0$.

Периферийная информация для каждого значения $S_{a_j}^0$ выражается следующим образом:

$$I_n = \check{C} S_{A_j}^{0,1} dK_a, \quad \text{где } S_{A_j}^{0,1} = \check{D}\check{D} S_{A_j}^{0,1} dI_{ц} - I_{ц} = \check{C} S_{A_j}^{0,1} dI_{ц}.$$

Здесь символом $\check{D}\check{D}$ обозначена полная двухместная декомпозиция.

Периферийная информация рассматриваемого объекта S_A определяется через периферийную информацию отдельных образов последовательности $\{S_{A_j}^0\}$ в следующем виде:

$$I_n = \check{C}(\check{C} I_n^j dK_A)dI_{ц}.$$

Далее проводится расширение периферийной информации:

$$I_n \xrightarrow{U_A(R_k) \rightarrow U_A^*(R_k)} I_n^*.$$

Это становится возможным при объединении в $U_a^*(R_k)$ отношений из $U_a(R_k)$ и альтернативных им отношений.

Операция расширения $I_n \rightarrow I_n^*$ и последующие операции понятны и определены в том случае, когда определены система принятых понятий для исследуемого СГО и синтаксис для построения образов элементов последовательности $\{S_{A_j}^0\}$ [3].

Расширение $I_n \rightarrow I_n^*$ может являться обратной операцией для получения полной информации о составных элементах последовательности $\{S_{A_j}^0\}$ как соответствующего свойства объекта при формировании облика СГО.

Это возможно при условии, если полученные нами периферийная и центральная информации об исследуемом объекте будут сверсткой полной информации обо всех членах последовательности $\{S_{A_j}^0\}$.

В этом случае появляется возможность сформировать последовательность всех реальных значений для образов свойства объекта над уровнем отношений $U_a^*(R_k)$.

Если взять за исходные данные совокупность назначенных свойств объекта, тогда процедура морфологической декомпозиции содержания совокупности назначенных свойств объекта (как исходной информации) позволит нам построить граф для характеристики свойств объекта (рис. 1).

Причем на рисунке символ $S_{A_i}^0$ обозначает соответствующие свойства параметров.

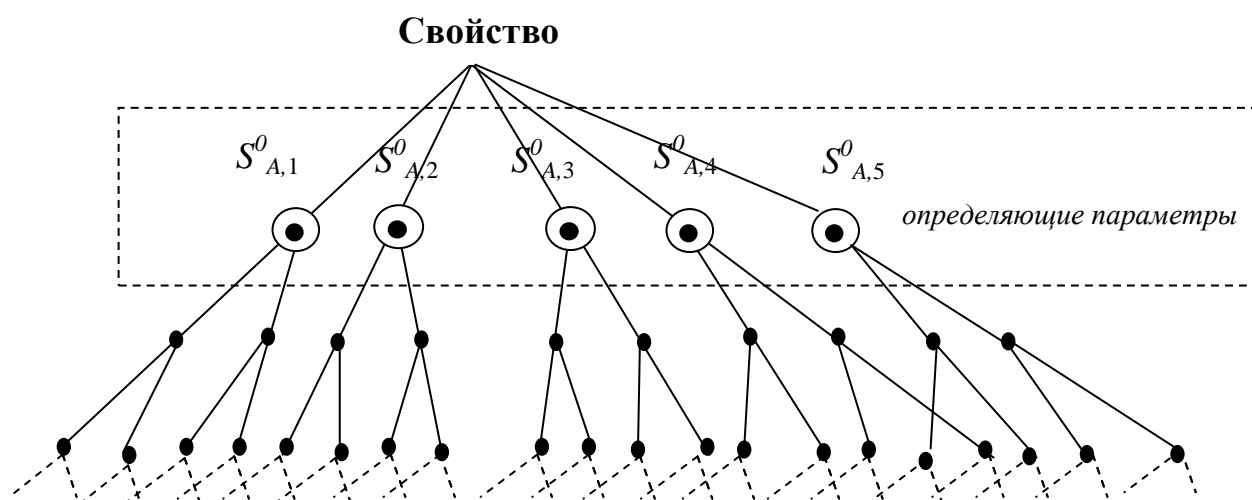


Рис. 1. Структура графа, характеризующего свойство объекта

Используемый нами морфологический анализ позволяет сформировать определенную последовательность операций, отраженных на рис. 2, целью которых является определение параметров показателей $\Pi_{защ}$ и $\Pi_{дв}$.

При проведении расчетов используются следующие значения:

- 1) n – для обозначения соотношения количества измерений определяющих параметров и независимых единиц измерения;
- 2) m – определяется из условий безразмерности комплексов (π).

Для зависимостей функций результата целевые показатели (q) СЗ обусловлены требованиями, предъявляемыми к СГО и показанными на рис. 3.

Эти требования указываются в технических характеристиках (ТХ) СГО, а их перечень составляет совокупность свойств комплекса.

Для выявления показателей этих свойств (аргументов функции результата и функции показателей) необходимо провести лингвистический выбор определений, набор которых достаточно объемён [4].

Так, например, для выявления показателей свойства «надежность» нужно учитывать, что существует принятая ранее характеристика свойства «надежность». Она заключается в способности объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров.

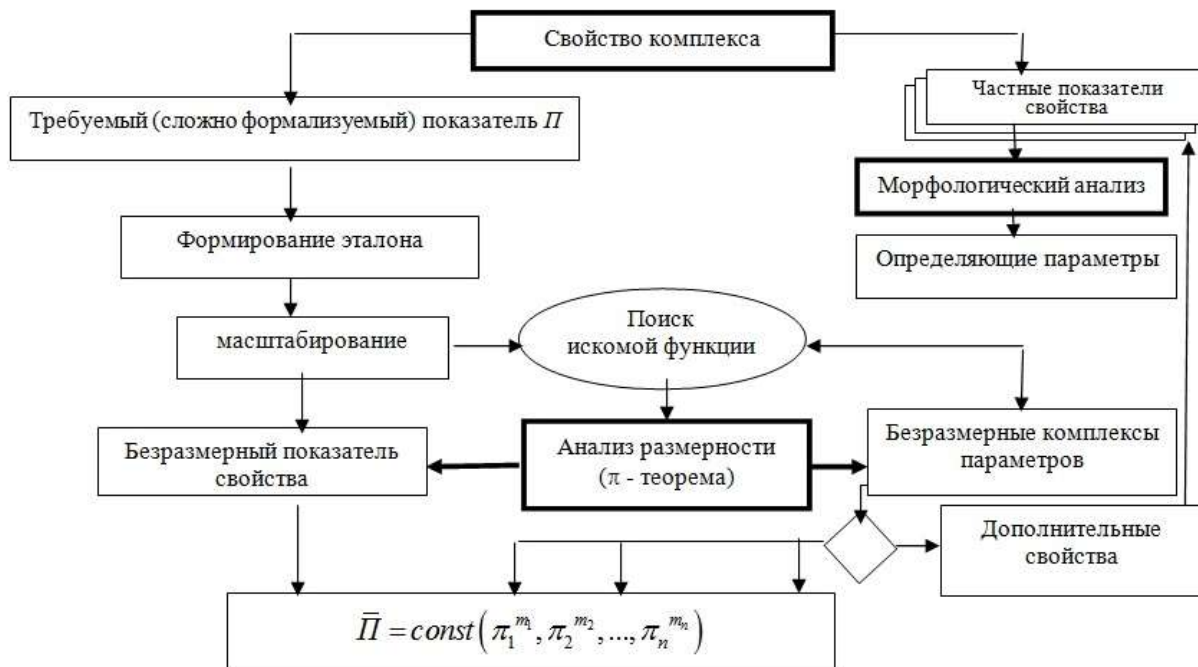


Рис. 2. Алгоритм определения параметров для показателей СГО



Рис. 3. Требования, предъявляемые к СГО при его проектировании и определяющие его свойства

Данные параметры характеризуют способность объекта выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения (технического обслуживания, хранения и транспортирования) [5].

Кроме того, известно, что «надежность» является комплексным свойством. Это свойство включает в себя целую группу частных показателей.

Смысловое содержание этих частных показателей разнообразно и может быть систематизировано в следующие формулировки, изложенные в ГОСТ 27.002-89:

1) безотказность – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки;

2) долговечность – свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта;

3) ремонтпригодность – свойство объекта, заключающееся в приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта;

4) сохраняемость – свойство объекта сохранять в заданных пределах значения параметров, характеризующих способности объекта выполнять требуемые функции, в течение и после хранения и (или) транспортирования;

5) способность – свойство, характеризующее возможности объекта производить те или иные действия с ним, выполнять ту или иную работу.

Таким образом, свойство «надежность» интегрирует в себе структуру частных показателей, представленных на рис. 4.

Лингвистические действия в отношении свойства «безопасность» нужно проводить аналогично, но уже на основе исследования частных показателей, представленных на рис. 5.

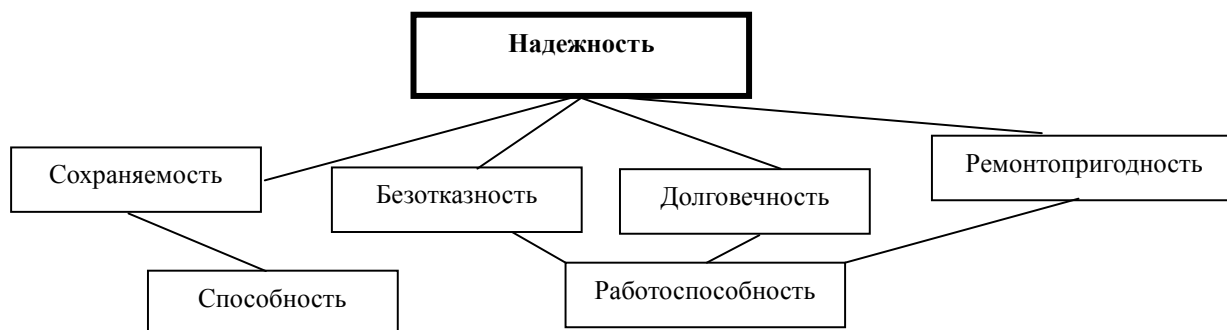


Рис. 4. Частные показатели, характеризующие свойство «надежность»

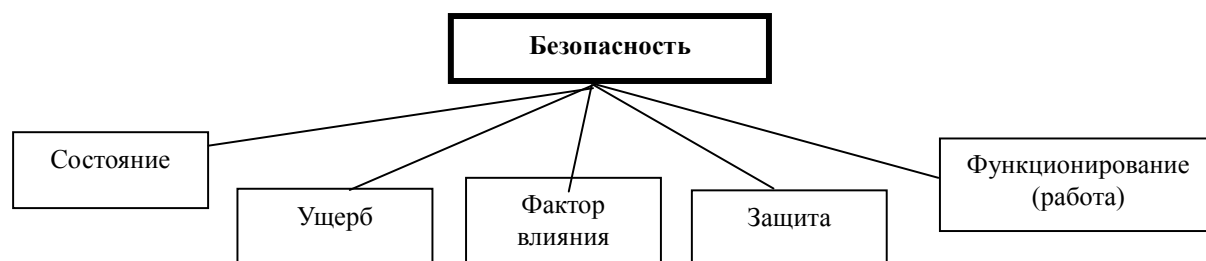


Рис. 5. Частные показатели, характеризующие свойство «безопасность»

Морфологический анализ позволяет определить состав групп целевых, ресурсных и временных показателей, а это дает возможность рассчитать параметры показателей защищенности и возможности деструктивного воздействия на СГО.

К целевым показателям (q) можно отнести параметры, определяющие живучесть, скрытность, оперативность, автономность, восстанавливаемость, безопасность и надежность СГО.

В состав же ресурсных показателей входят энергетические (E) и стоимостные (C) показатели деятельности СГО. Временные показатели (t) деятельности СГО традиционны и характеризуются временными интервалами выполнения работ.

Исследуемые нами простые свойства СГО являются следствием выполнения действий (работ) следующей направленности:

- 1) работоспособность – следствие выполнения работы системой (элементом) по назначению;
- 2) восстанавливаемость – следствие выполнения работы по устранению отказов и неисправностей;
- 3) долговечность – следствие выполнения действий по обеспечению работоспособности, сохраняющейся во времени;
- 4) резервирование – следствие выполнения работы по изменению структуры;
- 5) отказоустойчивость – следствие работоспособности при отказах;
- 6) прочность – следствие работоспособности при действии нагрузок.

Представленный выше морфологический анализ позволяет свести множество свойств СГО к легко формализуемым физическим параметрам, таким как работа (энергия или мощность) и время. Исключение составляют стоимостные показатели, так как свойство стоимости (C) тоже оценивается работой или ресурсами (R), но в денежном выражении.

Стоимость является субъективной характеристикой всего объема работ, описывающих жизненный цикл объекта, поэтому нами в исследованиях не используется.

СТРУКТУРА ПОКАЗАТЕЛЕЙ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ БЕЗОПАСНУЮ ЭКСПЛУАТАЦИЮ СЛОЖНОГО ГРУППОВОГО ОБЪЕКТА

Результаты морфологического анализа свойств СГО, характеризующих его безопасную эксплуатацию, позволяют определить параметры общего (системного) показателя для оценивания последствий воздействия на СГО внешних деструктивных факторов (показатель $Y_{ДВ}^{ВДФ}$) с помощью частных показателей (табл. 1).

Используя данные показатели, мы можем записать функции результата для показателей эффективности СГО при деструктивном воздействии на него.

Записанные в общем виде они имеют вид:

$$(Y_{ДВ}^{ВДФ})^{тр} = f_1(m_{ДВ}, P_1, I_1, L, t, E),$$

$$(Y_{ДВ}^{ВДФ})^{реал} = f_2(m_{ДВ}, P_2, I_2, L, t, E).$$

Данные функции отразим с использованием стоимостных параметров:

$$(Y_{ДВ}^{ВДФ})^{тр} = f_1(m_{ДВ}, P_1, I_1, L, t, C),$$

$$(Y_{ДВ}^{ВДФ})^{реал} = f_2(m_{ДВ}, P_2, I_2, L, t, C).$$

Также предоставляется возможность записать функции результата для показателей эффективности комплекса на этапе функционирования СГО.

Общий вид функций выглядит следующим образом:

$$(Y_{защ}^{СГО})^{тр} = f_3(P_2, I_2, \Delta P_{ф}, V_{форт}, R, t, E),$$

$$(Y_{ДВ}^{ВДФ})^{реал} = f_4(P_2, I_2, \Delta P_{ф}, V_{форт}, R, t, E).$$

Таблица 1

Частные показатели, характеризующие безопасную эксплуатацию СГО

Возможность деструктивного воздействия		Возможность безопасной эксплуатации	
Показатель	Обозначение	Показатель	Обозначение
Группа показателей назначения			
Величина средства, необходимого для деструктивного воздействия	$m_{дв}$	Вероятность отсутствия нарушения потоков информации (управляющей, оповещающей, предупреждающей)	I_2
Оперативность деструктивного воздействия	t	Вероятность безотказного функционирования оборудования	P_2
Максимальная дальность полета средства при деструктивном воздействии	L	Уровень допустимого ударно-волнового воздействия	ΔP_{ϕ}
Вероятность отсутствия нарушения потоков информации	I_1	Масштаб фортификационных сооружений для комплекса	$V_{\text{форт}}$
Вероятность успешности деструктивного воздействия	P_1	Периодичность выполнения регламентных работ	t
		Назначенные показатели ресурса	R
Группа показателей ресурсопотребления			
Стоимостные показатели комплекса	C	Стоимостные показатели комплекса	C
Работа, необходимая для достижения поставленной цели	E	Работа, необходимая для достижения поставленной перед комплексом цели	E

Функции, полученные с использованием стоимостных параметров, имеют вид:

$$(Y_{\text{защ}}^{\text{СГО}})^{\text{тр}} = f_3(P_2, I_2, \Delta P_{\phi}, V_{\text{форт}}, R, t, C),$$

$$(Y_{\text{дв}}^{\text{ДВФ}})^{\text{реал}} = f_4(P_2, I_2, \Delta P_{\phi}, V_{\text{форт}}, R, t, C).$$

Значение Y это функция постоянных и переменных параметров, которые считаются определяющими.

Такая функция получена на основании имеющейся системы принятых понятий и набора исходных данных по назначенным свойствам рассматриваемых объектов:

$$Y = f(q_1 \dots q_m, R_1 \dots R_n, t_1 \dots t_k).$$

Для определения сути этих функций необходимо проанализировать их размерности [4].

При этом регламентировано, что всякое соотношение между размерными величинами можно сформулировать как соотношение между безразмерными величинами.

Использование аппарата анализа размерности позволяет представить исследуемую функцию в зависимость, которая состоит из известных параметров. Причем эти параметры влияют на нее. При анализе необходимо учитывать тот факт, что мы не знаем законов, по которым параметры связаны.

Согласно π -теоремы можно констатировать следующее положение.

Если исследуемая безразмерная величина является функцией нескольких размерных величин, то такая функция может зависеть только от безразмерных комбинаций, составленных из определяющих (n) размерных величин [5]:

$$Y=f(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n),$$

где π_i – комбинации определяющих параметров (p_i), имеющих нулевую размерность $[\pi]=0$:

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

Возможен вариант, когда количество основных единиц измерения (n) совпадет с количеством определяющих параметров (k), имеющих независимые размерности. Тогда теория размерности позволит определить эту зависимость с точностью до постоянного множителя:

$$Y = \text{const} p_1^{m_1} p_2^{m_2} \dots p_n^{m_n}.$$

Поэтому для определения Y необходимо найти нужное количество основных единиц измерения, которые независимы между собой.

Наличие условия независимости единиц измерения говорит о невозможности выразить один параметр через другой, что представляется в выражении следующего вида:

$$[p_1] \neq [p_2]^a [p_3]^b [p_4]^c [p_5]^d.$$

Можно сделать вывод о составе функции показателя защищенности из таких определяющих параметров, которые имеют следующие размерные величины:

$$\Delta P_{\phi}, V_{\text{форт}}, t, E, P_2, I_2, R$$

Для этих пяти параметров ($n=5$) приняты следующие единицы измерения:

$$[\Delta P_{\phi}] = \text{н/м}^2, [V_{\text{форт}}] = \text{м}^3, [t] = \text{с}, [E] = \text{дж}, [R] = \text{нет}, [P_2] = \text{нет}, [I_2] = \text{нет}.$$

Независимыми единицами измерения для сформированного набора являются три параметра ($k=3$). К ним относятся секунда, килограмм и метр.

Следовательно, в рассматриваемом примере, согласно π -теореме $n-k=2$.

При таком условии структура искомой зависимости формируется на основе двух безразмерных комплексов (π_1 и π_2), поскольку сама функция результата в данном случае также безразмерна:

$$Y_{\text{защ}}^{\text{СГО}} = f(\pi_1, \pi_2).$$

Процедура формирования безразмерных комплексов π проста. Если параметр, который входит в комплекс, приводит к росту функции результата, он записывается в числителе безразмерного комплекса, а если рост численного значения снижает величину функции, то он записывается в знаменателе.

Каждый параметр, входящий в соответствующий комплекс, должен иметь показатель степени, численное значение которого выставляется из условия отсутствия размерности у комплекса в целом.

В рассматриваемом случае

$$\pi_1 = P_2 \cdot I_2 = [-],$$

$$\pi_2 = \frac{\Delta P_{\phi} V_{\text{форт}} R}{t E} = \frac{\text{м}^3 \text{с н/м}^2}{\text{с (нм)}} = [-],$$

тогда

$$Y_{\text{защ}}^{\text{СГО}} = \text{const} (P_2 I_2) \frac{\Delta P_{\phi} V_{\text{форт}} R}{t E},$$

где const – неопределенная константа.

Теперь, с учетом того, что реальный результат (Y^{real}) всегда хуже (меньше) требуемого (Y^{mp}), можно записать функцию для показателя защищенности комплекса в виде

$$\bar{\Pi}_{защ}^{СГО} = \frac{(Y_{защ}^{СГО})^{реал}}{(Y_{защ}^{СГО})^{тр}} = \frac{(\text{const } P_2 I_2 \frac{\Delta P_{\phi} V_{\text{форт}} R}{t E})^{реал}}{(\text{const } P_2 I_2 \frac{\Delta P_{\phi} V_{\text{форт}} R}{t E})^{тр}} = \bar{P}_2 \bar{I}_2 \frac{\overline{\Delta P_{\phi} V_{\text{форт}} R}}{\bar{t} \bar{E}}$$

или

$$\bar{\Pi}_{защ}^{СГО} = \bar{P}_2 \bar{I}_2 \frac{\overline{\Delta P_{\phi} V_{\text{форт}} R}}{\bar{t} \bar{E}}, \quad (1)$$

Функция для показателя защищенности комплекса на этапе деструктивного воздействия получается аналогичным образом:

$$\bar{\Pi}_{дв}^{ДВФ} = \bar{P}_1 \bar{I}_1 \frac{\overline{m_{дв} L^2}}{\bar{t}^2 \bar{E}}, \quad (2)$$

В выражениях (1) и (2) параметры с верхним надчеркиванием означают относительные значения.

Анализ размерности выражения (2) показал повышенную значимость некоторых параметров для показателя деструктивного воздействия.

Для него важны следующие параметры:

- максимальная дальность деструктивного воздействия (L);
- оперативность деструктивного воздействия (t).

В силу необходимости иметь безразмерное выражение показателя $\bar{\Pi}_{дв}^{ДВФ}$ параметрам (L) и (t) присвоены значения степеней равные двум.

В тоже время, анализ выражения (2) с позиций воздействия на внешний деструктивный фактор силами и средствами СЗ СГО показывает, что успешное воздействие на значение $\bar{\Pi}_{дв}^{ДВФ}$ можно оказать путем снижения величин $P_1^{реал}$ и $I_1^{реал}$.

Для определения путей снижения вероятности деструктивного воздействия на СГО, для примера, можно воспользоваться соотношением для определения вероятности деструктивного воздействия летательного аппарата на какой-либо объект.

Для деструктивного воздействия летательного аппарата на объект или группу объектов характерны следующие варианты:

- применение средства деструктивного воздействия большой мощности;
- применение одного или нескольких средств деструктивного воздействия более точного наведения.

Влияние мощности средства деструктивного воздействия и точности его доставки на вероятность деструктивного воздействия на объект рассмотрим на примере нанесения ущерба малоразмерной (точечной) цели.

Известно, что вероятность нанесения ущерба такой цели одним средством деструктивного воздействия определяется соотношением [6]:

$$P_1^{реал} = 1 - e^{-\left(\frac{pr}{КВО}\right)^2},$$

- где r – радиус зоны деструктивного воздействия на цель, измеряемый в метрах;
 $КВО$ – круговое вероятное отклонение точки падения средства деструктивного воздействия от цели в метрах;
 ρ – аргумент функции Лапласа, которая выражается следующей зависимостью:

$$\Phi(z) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$

Принято, что $\rho \approx 0,477$.

В этом случае значение функции Лапласа можно представить в виде

$$\Phi(\sqrt{2\rho})=0,5$$

Радиус зоны деструктивного воздействия r связан с величиной деструктивного воздействия Q известной зависимостью $r = \text{const} \sqrt[3]{Q}$.

Отсюда следует, что вероятность деструктивного воздействия на объект является функцией следующих двух аргументов:

$$P=f(Q, \text{КВО}).$$

Поэтому, для повышения вероятности деструктивного воздействия на объект, необходимо выполнить следующие действия на выбор:

- 1) увеличивать величину деструктивного воздействия – Q ;
- 2) уменьшить круговое вероятное отклонение точки падения средства деструктивного воздействия от цели – КВО.

Из этого же выражения также можно заключить, что снижение КВО сильнее влияет на увеличение вероятности деструктивного воздействия (квадратичная зависимость), чем увеличение мощности средства деструктивного воздействия (показатель степени $\frac{2}{3} < 2$).

Отсюда возникает одна из решаемых задач СЗ СГО – создание условий по увеличению величины КВО, т. е. условий, когда авиационное средство не способно войти в зону поражения.

Такой результат также можно получить, если усилить воздействие на второй компонент $\bar{P}_{\text{дв}}^{\text{ВДФ}}$ – систему управления летательного аппарата, выдачей ложной информации о среде его полета.

Оба направления обуславливают необходимость создания на траектории действий летательного аппарата защитного экрана, способного механически ограничить его полет и (или) нарушить основные условия успешности движения этого летательного аппарата, т. е. нарушить его устойчивость и управляемость.

На основании вышеизложенного предоставляется возможность создать методику оценивания уровня безопасной эксплуатации сложного группового объекта от деструктивного воздействия внешними деструктивными факторами.

Основные этапы предлагаемой методики представлены на рис. 6.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сложность задач, решаемых в процессе эксплуатации СГО, существенные материальные затраты, связанные с их созданием (строительством) и функционированием, обуславливают важность этих объектов, а значит необходимость их надежной безопасной эксплуатации даже в условиях воздействия различных негативных факторов.

Предлагаемый в статье методический аппарат позволяет адекватно оценивать уровень влияния внешних деструктивных факторов на безопасную эксплуатацию СГО при детальном рассмотрении этих факторов. Учитывая, что в большей степени деструктивные факторы влияют на рассматриваемую предметную область (взаимодействие составных частей СГО), то данный подход может служить инструментом для научного обоснования облика эффективной системы защиты, обеспечивающей устойчивое функционирование СГО в условиях воздействия на них различных внешних деструктивных негативных факторов.

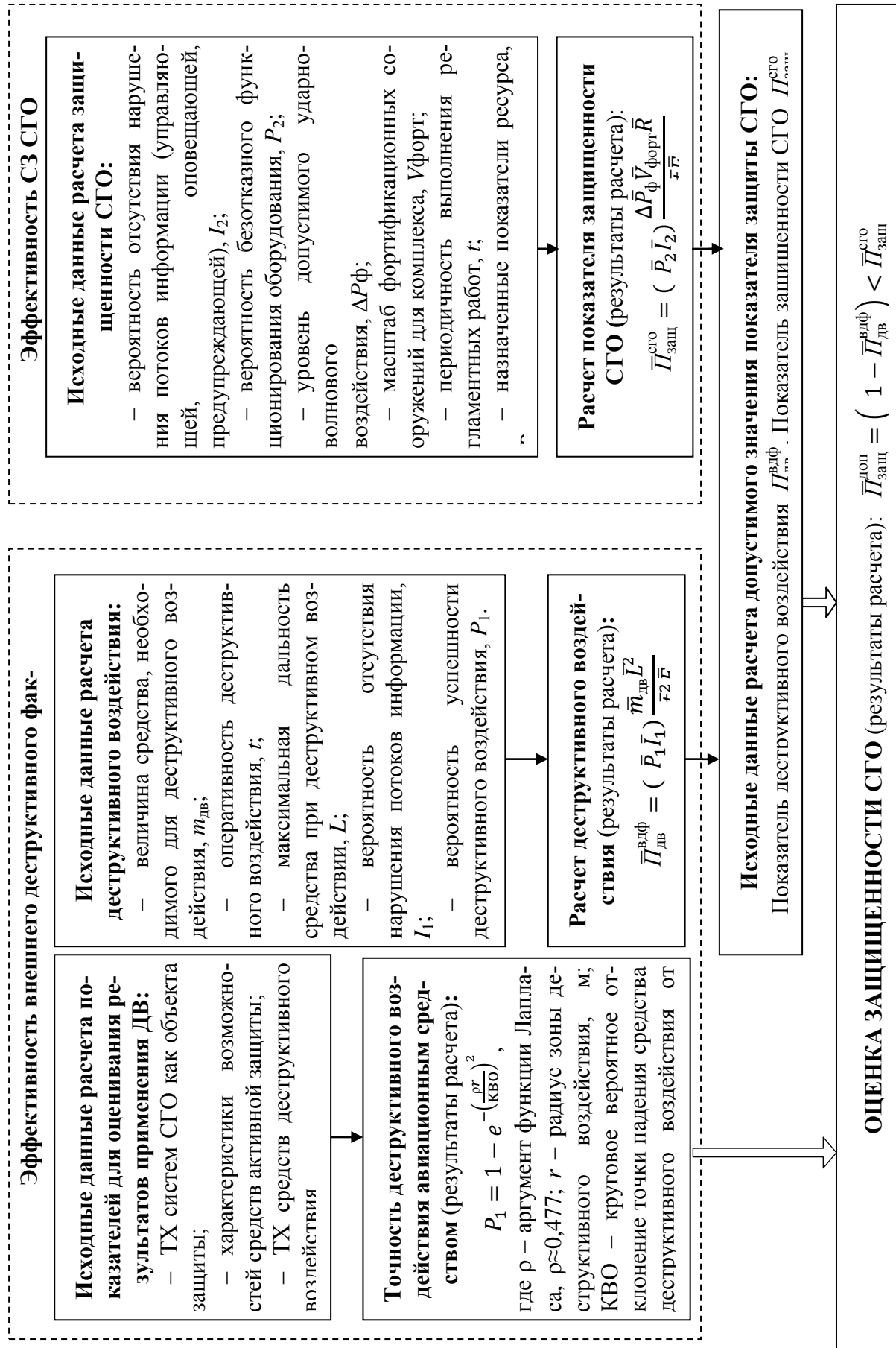


Рис. 6. Методика оценивания уровня безопасной эксплуатации СГО

Список используемых источников

1. *Петухов Г.Б., Якунин В.И.* Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремленных систем. – М.: АСТ, 2006. – 504 с.
2. Метод структуризации системы показателей свойств ракетно-космического комплекса / А.В. Лагун [и др.] // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 667. – С. 327–336.
3. *Лагун А.В., Козлов В.В., Казахов Б.Д.* Обоснование показателей для оценки результативности функционирования системы защиты ракетно-космического комплекса в условиях внешнего деструктивного воздействия // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2020. – Вып. 675. – С. 36–44.
4. *Назаров А.А.* Морфологическое прогнозирование развития военной техники. – МО СССР, 1986. – 248 с.
5. *Ожегов С.И., Шведова Н.Ю.* Толковый словарь русского языка / РАН; Российский фонд культуры. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: АЗЪ, 1994. – 928 с.
6. *Козлов В.В.* Основы проектирования ракетно-космических комплексов. Системотехника РКК для инженеров механиков. – СПб.: ВИКУ им. А.Ф. Можайского, 1999. – 365 с.
7. Технические основы эффективности ракетных систем / Е.Б. Волков [и др.]; под ред. Е.Б. Волкова. – М.: Машиностроение, 1989. – 256 с.

В.В. Какаев*,
доктор военных наук, доцент;

С.В. Куликов*,
кандидат технических наук;

Д.С. Федоренко*;

И.В. Чеботарь**,
доктор технических наук

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

**Военный университет радиоэлектроники, г. Череповец

МЕТОДИКА КЛАССИФИКАЦИИ СПЕКТРОВ ОТРАЖЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ ОБЪЕКТА РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

В статье проведен анализ влияния идентичных материалов, одновременно находящихся в специальной базе данных эталонных спектров отражения, на точность количественной интерпретации спектров отражения космических объектов, проводимой в рамках мониторинга околоземного космического пространства. Предложено использовать новую классификацию спектров отражения материалов и покрытий (по коэффициенту взаимной корреляции) и оставлять в каждом классе формируемой базы данных по одному материалу-представителю. Показана зависимость результативности идентификации космических объектов от порогового значения коэффициента корреляции спектров отражения материалов и покрытий.

Ключевые слова: коэффициент корреляции, спектр отражения, космический объект, материал, покрытие.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время идентификация объектов на околоземной орбите в подавляющем большинстве случаев выполняется с использованием информации об их размере и местоположении. В частности, происходит отождествление текущих траекторных параметров, полученных в результате наблюдения объекта в прогнозируемом положении в прогнозируемое время, с известными параметрами орбиты [1]. Однако, такой метод эффективен только для контроля известных объектов и не обеспечивает достаточную степень определенности при изучении вновь образовавшихся объектов, например, космического мусора. Чтобы получать данные о свойствах поверхности космического объекта (КО), которые повышают качество идентификации, необходимы более информативные методы [2, 3, 4]. С этой целью проводят исследования спектров отражения солнечного света от объектов [5].

Спектроскопия – метод, используемый в различных областях науки и техники для идентификации материалов. В частности, при изучении космических объектов полезно использовать отражательную спектроскопию (спектрофотометрию): отраженный от объекта свет пропускают через диспергирующий элемент, где он разбивается по длинам волн, после чего в заданном диапазоне с определенным шагом измеряется интенсивность светового потока. После ряда дополнительных вычислений рассчитывается спектр отражения космического объекта, свойства которого можно использовать для идентификации материала, от которого отражается свет.

Методы количественной интерпретации спектров отражения, т. е. определения доли содержания материалов на видимой поверхности КО, разработаны [3, 4, 6, 7], однако существует ряд проблем с выявлением идентичных материалов, схожих по своим спектральным характеристикам. Одновременное наличие таких спектров отражения в базе данных, с которой проводится сравнение, приводит к значительным ошибкам определения истинных долей содержания материалов и покрытий (МиП) КО, что, в свою очередь, снижает эффективность

мониторинга околоземного космического пространства. Целью данной работы является разработка методики классификации спектров отражения МиП ракетно-космической техники для определения долей их содержания на поверхности космического объекта, обеспечивающей минимальные ошибки в ходе количественной интерпретации спектров отражения.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ИДЕНТИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ТОЧНОСТЬ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ СПЕКТРОВ ОТРАЖЕНИЯ

Рассмотрим пример, когда в базе данных эталонных спектров отражения (БДЭСО) есть два идентичных по спектральным характеристикам МиП: Electrical Tape и Machined Aluminum (магровая) (рис. 1). С помощью модели спектра отражения КО [8] сформируем спектр (рис. 2) с исходными данными, указанными в табл. 1.

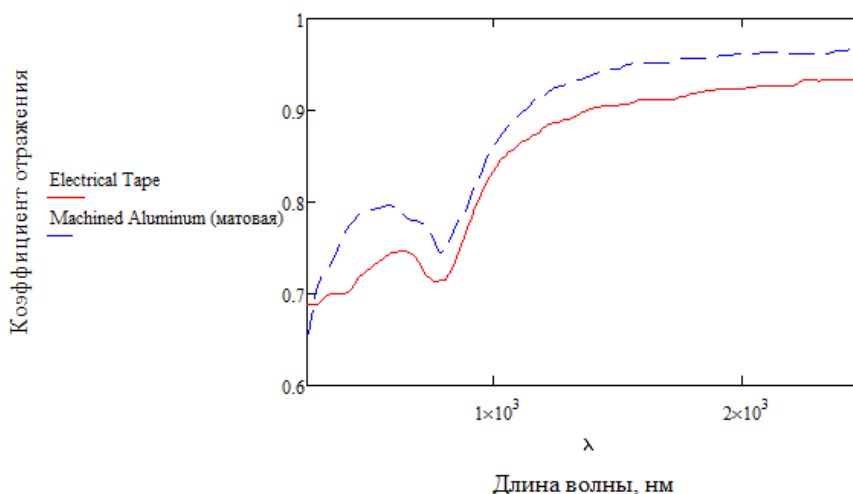


Рис. 1. Спектры отражения Electrical Tape и Machined Aluminum

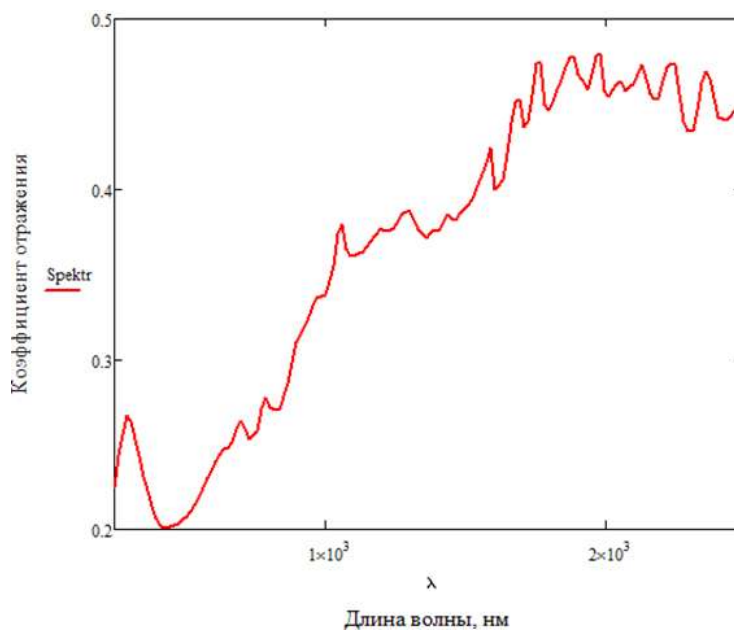


Рис. 2. Смоделированный спектр отражения с долями содержания МиП 0.25/0.65/0.1

Таблица 1

**Исходные данные по МиП и долям их содержания
для моделирования спектра отражения**

МиП (конструктивный элемент)	Electrical Tape (антенна)	CIC Solar Cells – ST-5 (солнечные батареи)	ITO Kapton (термозащитное покрытие)
Доля содержания	0,25	0,65	0,1

Для количественной интерпретации смоделированного спектра отражения воспользуемся ранее разработанным методом [4] (табл. 2).

Таблица 2

Результаты определения долей содержания МиП

МиП	Electrical Tape	CIC Solar Cells – ST-5	ITO Kapton	Machined Aluminum	AZ-3700-LSW
Доля содержания	0	0,558	0,15	0,113	0,088

Из расчетов следует, что вместо Electrical Tape определился другой материал, похожий на него, – Machined Aluminum – с долей 0,113, что меньше заданной – 0,25. Разница, по-видимому, компенсировалась наличием еще одного материала – AZ-3700-LSW (рис. 3), также имеющего сходный с Electrical Tape спектр, с долей содержания 0,088.

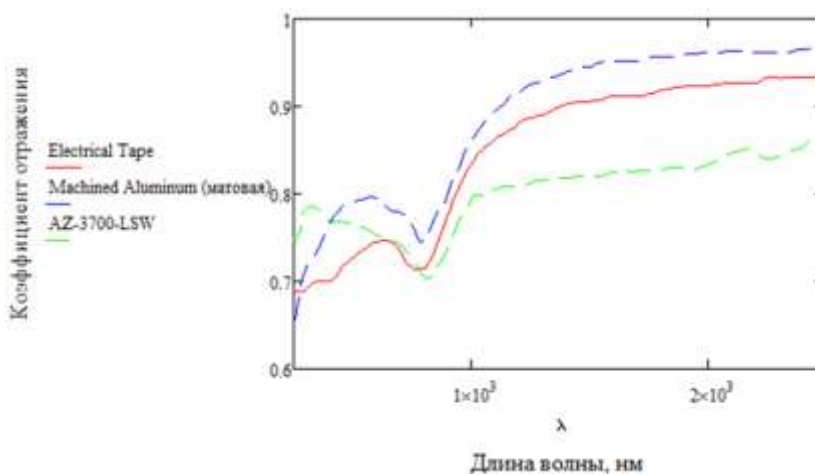


Рис. 3. Спектры отражения Electrical Tape, Machined Aluminum, AZ-3700-LSW

На рис. 3 видно, что все три спектра похожи по форме и обладают одной общей особенностью – полоса поглощения в диапазоне 820–830 нм. Это характерная черта спектра алюминия, который входит в состав всех трех покрытий.

Вернемся к первоначальному примеру, но увеличим долю Electrical Tape до 0,5 и смоделируем спектр согласно данным табл. 3.

Результаты обработки спектра представлены в табл. 4.

Таблица 3

Исходные данные по МиП и долям их содержания

Electrical Tape	CIC Solar Cells – ST-5	ITO Kapton
0,5	0,3	0,2

Таблица 4

Результаты определения долей содержания МиП

Electrical Tape	CIC Solar Cells – ST-5	ITO Kapton	Machined Aluminum	SiO _x -VDA-Kapton	AZ-3700-LSW
0	0,231	0,194	0,16	0,093	0,066
Clear Anod Alum	Polished Aluminum	HST SAIII Solar Cell	SiO _x -Kapton-VDA	Aladyne Aluminum 2024	
0,065	0,065	0,056	0,032	0,038	

Из данных табл. 4 следует, что доля Electrical Tape по-прежнему составила 0 и распределась уже по большему числу других идентичных МиП (рис. 4).

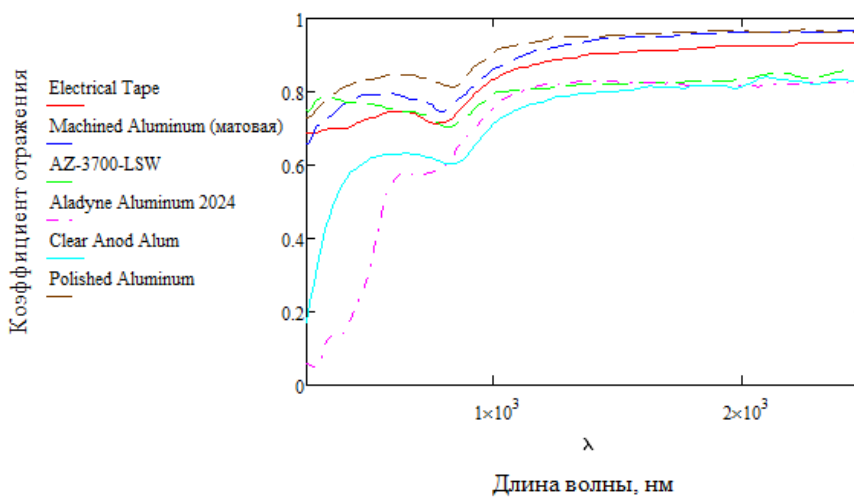


Рис. 4. Спектры отражения Electrical Tape, Machined Aluminum, AZ-3700-LSW и др.

Сравнивая рис. 3 и 4, видно, что добавившиеся МиП также имеют характерную для алюминия особенность – полоса поглощения на уровне 820–830 нм.

«Размазались» и доли двух других искомым МиП: помимо солнечных батарей CIC Solar Cells ST-5 появился их аналог HST SAIII Solar Cell (рис. 5), а помимо ITO Kapton определились идентичные покрытия SiO_x-VDA-Kapton, SiO_x-Kapton-VDA (рис. 6).

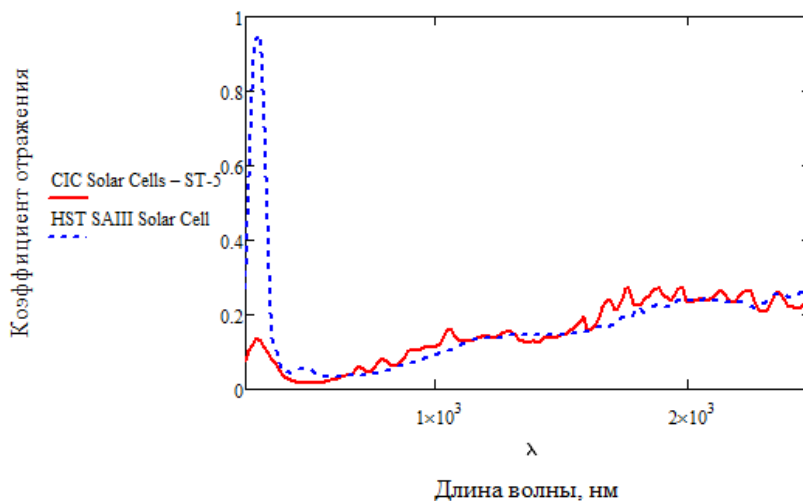


Рис. 5. Спектры отражения CIC Solar Cells – ST-5, HST SAIII Solar Cell

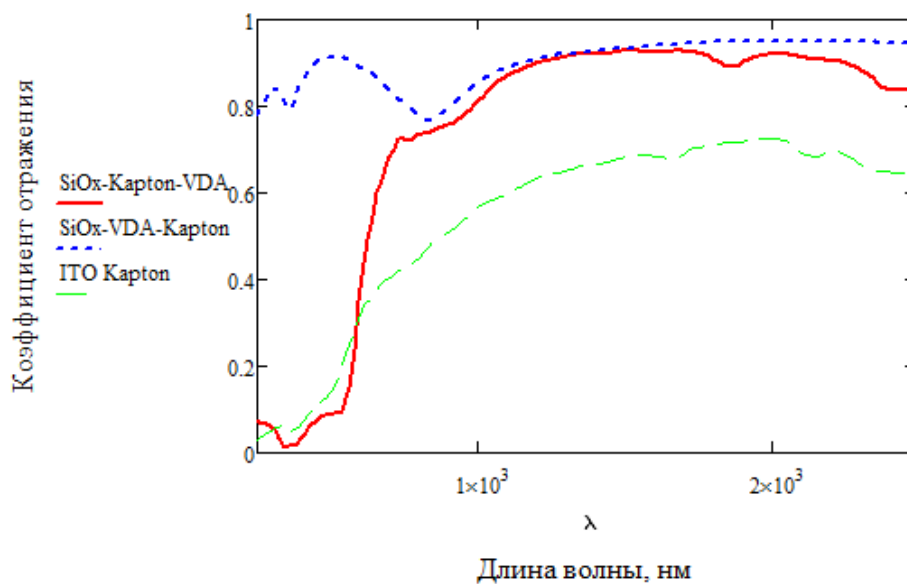


Рис. 6. Спектры отражения ITO Kapton - SiOx-VDA-Kapton, SiOx-Kapton-VDA

Увеличим долю Electrical Tape до 0.7 и смоделируем спектр согласно данных табл. 5 (рис.7). Результаты обработки спектра представлены в табл. 6.

Таблица 5

Исходные данные по МиП и долям их содержания

Electrical Tape	CIC Solar Cells – ST-5	ITO Kapton
0,7	0,17	0,13

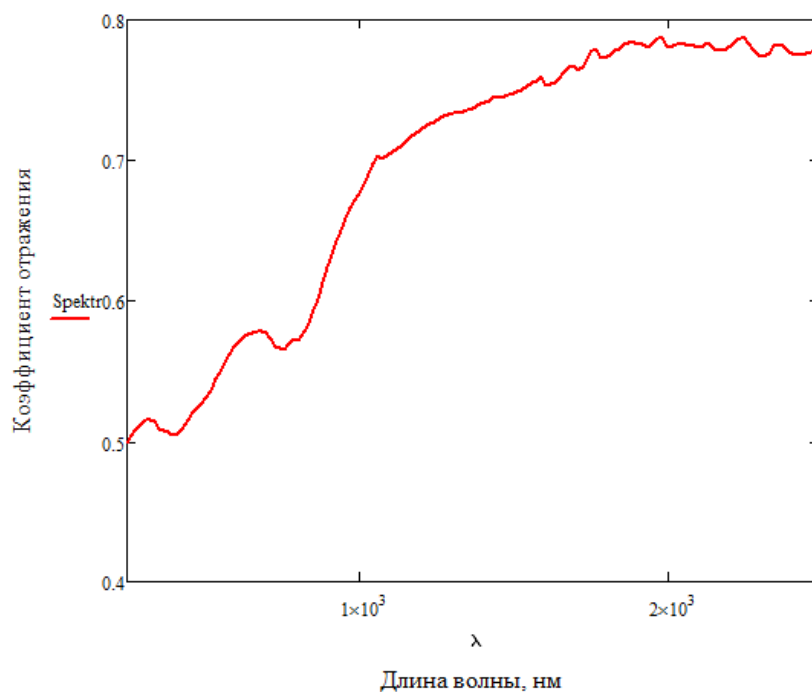


Рис. 7. Смоделированный спектр отражения с долями содержания МиП 0.7/0.17/0.13

Таблица 6

Результаты определения долей содержания МиП

Electrical Tape	CIC Solar Cells – ST-5	ITO Kapton	Machined Aluminum	SiO _x -VDA-Kapton	AZ-3700-LSW
0,568	0,059	0,048	0,022	0,014	0,012
Clear Anod Alum	Polished Aluminum	HST SAIII Solar Cell	SiO _x -Kapton-VDA	Aladyne Aluminum 2024	AMJ-450-LSG
0,025	0	0,054	0,027	0,026	0,02
Black Kapton 100XC Film	Black Nickel on Aluminum	Un-coated BeCu			
0,024	0,033	0,021			

Как показали результаты вычислений, только после значительного увеличения исходной доли (до 0,7) Electrical Tape начал правильно определяться, но рассчитанная доля оказалась меньше заданной на 13 %, а разница, как и в предыдущих случаях, распределилась среди других алюминесодержащих МиП (Machined Aluminum - 2.2%, AZ-3700-LSW – 1.2 %, Clear Anod Aluminum – 2.5 %, Aladyne Aluminum 2024 – 2.6 %, Black Nickel on Aluminum – 3.3 %). Аналогичная картина и для двух оставшихся МиП: доля солнечных батарей практически пополам распределилась между истинным CIC Solar Cells – ST-5 и ложным HST SAIII Solar Cell, доля ITO Kapton определилась также на 50 % верно, остаток распределился между каптонсодержащими МиП.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ КЛАССИФИКАЦИИ СПЕКТРОВ ОТРАЖЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОЛЕЙ ИХ СОДЕРЖАНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ КОСМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА

Как было показано выше, наличие в БДЭСО материалов с похожими спектрами отражения приводит к значительным ошибкам в определении долей их содержания на видимой поверхности КО, вплоть до перепутывания материалов, что безусловно приведет к ошибочным решениям при идентификации наблюдаемых объектов.

Очевидно, что имеет смысл так организовать формирование БДЭСО, чтобы минимизировать количество схожих МиП, при этом сохраняя заданный уровень ошибки определения долей содержания.

В качестве критерия «похожести» спектров отражения предлагается выбрать значение коэффициента их взаимной корреляции и на основе этого значения провести классификацию МиП. Далее нужно определить группы МиП с коэффициентом корреляции больше текущего порогового значения. В каждой такой группе необходимо оставить по одному материалу – «представителю», который чаще остальных, по имеющимся статистическим данным, используется в спутникостроении. Остальные материалы группы из БДЭСО удаляются. Таким образом, определенному пороговому значению коэффициента корреляции k будет соответствовать своя БДЭСО, или точнее ее объем M .

Чтобы определить необходимый и достаточный объем БДЭСО, нужно для каждого рассматриваемого варианта « k – M » рассчитать относительную ошибку определения долей содержания МиП и путем моделирования процесса идентификации КО оценить влияние этой ошибки на результативность идентификации. Результаты таких расчетов представлены в табл. 7.

Таблица 7

**Результаты моделирования идентификации КО
в зависимости от порогового значения коэффициента корреляции**

$k_{\text{порог}}$	0,95	0,9	0,85	0,8	0,75	0,7	0,65	0,6	0,55
M	40	31	29	26	22	20	17	11	7
$\delta_i, \%$	50	37	24	13,6	12,2	10	7,5	6,1	5,7
P	0,62	0,69	0,71	0,75	0,78	0,83	0,75	0,68	0,63

Относительная ошибка определения долей содержания МиП δ_i вычисляется следующим образом:

$$\delta_i = \frac{p_i - x_i}{p_i},$$

где p_i – заданная доля содержания;
 x_i – рассчитанная доля содержания.

Результативность идентификации находится из соотношения

$$P = \frac{N^*}{N},$$

где N^* – число правильно идентифицированных объектов;
 N – общее число объектов, участвующих в моделировании процесса идентификации.

Анализ полученных результатов подтверждает тот факт, что с уменьшением количества групп материалов в БДЭСО уменьшается и относительная ошибка определения долей их содержания, однако результативность идентификации КО растет до определенного предела, достигая максимального значения 0,83. Это связано с тем, что с уменьшением объема БДЭСО до определенных значений начинает падать различительная способность доли содержания как признака распознавания.

Таким образом, методика классификации спектров отражения МиП должна состоять из следующих этапов:

- 1) расчет коэффициентов взаимной корреляции спектров отражения МиП;
- 2) выбор порогового значения коэффициента корреляции;
- 3) классификация МиП по коэффициенту корреляции;
- 4) исключение всех материалов, кроме одного, наиболее часто используемого в спутникостроении, в классах МиП, где коэффициент корреляции превысил порог;
- 5) вычисление относительной ошибки определения долей содержания МиП и результативности идентификации с помощью моделирования процесса идентификации КО.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИКИ

На практике представляет интерес случай, когда в составе конструкции наблюдаемого КО есть материал, который в результате применения разработанной методики для заданного значения результативности идентификации исключен из БДЭСО. Логично предположить, что в таком случае в результате количественной интерпретации спектра отражения КО будет выявлен «представитель» этого класса МиП, оставленный в базе данных.

Для этого сформируем спектр (рис. 8) на основе данных табл. 8 с использованием солнечных батарей из HST SAIII Solar Cell, вместо которого в БДЭСО поместим CIC Solar Cells – ST-5 как представитель класса «солнечные батареи» (см. рис. 5). Оценим работу методики в этих условиях. Результаты обработки спектра представлены в табл. 9.

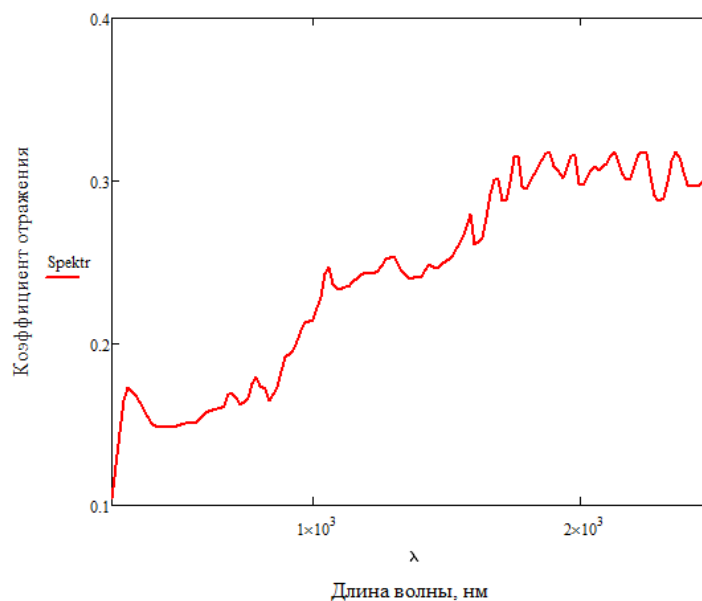


Рис. 8. Смоделированный спектр отражения с долями содержания МиП 0.2/0.5/0.3

Таблица 8

Исходные данные по МиП и долям их содержания

Clear Anod Alum	HST SAIII Solar Cell	Black Kapton 100XC Film
0,2	0,5	0,3

Таблица 9

Результаты определения долей содержания МиП

Clear Anod Alum	CIC Solar Cells – ST-5	Black Kapton 100XC Film
0,173	0,457	0,369

Как видно из расчетов, с использованием уточненной БДЭСО удалось установить факт наличия и достаточно точно определить долю содержания материала солнечной батареи (ошибка составила 4 %) даже в условиях, когда исходный материал в БД отсутствовал.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе исследования методов количественной интерпретации спектров отражения КО был обнаружен такой источник ошибок определения долей содержания, как наличие в базе данных эталонных спектров отражения идентичных МиП. При этом возникает нежелательный эффект распределения истинной доли содержания искомого материала по идентичным материалам. Для решения этой проблемы разработана специальная методика, в которой, в отличие от существующих, предлагается осуществлять классификацию МиП по коэффициенту взаимной корреляции спектров отражения. Это позволяет в зависимости от заданного значения результативности идентификации космических объектов определять необходимый и достаточный объем базы данных.

Список используемых источников

1. Jason B Rapp. Identification of orbital objects by spectral analysis and observation of space environment effects. – San Luis Obispo. – 2012.

2. *Логунов С.В., Черногубов А.В., Федоренко Д.С.* Определение конструктивных особенностей вращающегося геостационарного спутника на основе анализа двухцветных диаграмм // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. – 2018. – № 4. – С. 34–41.

3. *Резаева, А.А., Щербина М.П.* Метод виртуального смешивания цифровых лабораторных спектров отражения известных минералов для получения количественной интерпретации спектров отражения астероидов // Сборник тезисов докладов XIV всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса». Москва, 14–29 ноября 2016 г. – М.: ИКИРАН. – 2016. – С. 78–85.

4. Quantitative Interpretation Method of Reflection Spectra Obtained During Spectrophotometric Observations of Space Objects / D.S. Fedorenko [et al.]. // 2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, SYNCHROINFO 2020. – Svetlogorsk, 2020. – P. 9166006. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9166006> (дата обращения: 03.08.2021). – Doi: 10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166006.

5. *Бусарев В.В.* Спектрофотометрия астероидов и ее приложения. – Саарбрюккен: LAP LAMBERT Acad. Publish. GmbH & Co. KG, 2011. – 250 с.

6. Object Characterization from Spectral Data Using Nonnegative Matrix Factorization and Information Theory / J. Piper [et al.]. // Proc. AMOS Tech Conf., 2004. – URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Object-Characterization-from-Spectral-Data-Using-Piper-Pauca/43a2b5628faec3d5e8b22a211d825a9e8c0cad5c> (дата обращения: 03.08.2021).

7. K. Luu, C. Matson, J. Snodgrass, M. Giffin, K. Hamada and J. Lambert. “Object Characterization from Spectral Data”, Proc. AMOS Technical Conference, Maui, HI, 2003. – URL: https://archive.org/stream/DTIC_ADA423457/DTIC_ADA423457_djvu.txt (дата обращения: 03.08.2021).

8. *Fedorenko D.S., Legkov K.E.* Modeling of the High-Orbital Satellite Reflection Spectrum Based on Materials and Coatings Laboratory Reflection Spectra // 2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, 2020. – Moscow: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. – P. 9078649. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9078649> (дата обращения: 03.08.2021). – Doi: 10.1109/IEEECONF48371.2020.9078649.

Е.В. Копкин,
доктор технических наук, доцент;
В.В. Мышко,
кандидат технических наук, доцент

АЛГОРИТМ ВЫБОРА ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМЫ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ВЕКТОРОВ

В статье предложен достаточно простой в вычислительном отношении алгоритм, применение которого позволяет сократить размерность пространства диагностических признаков, используемых в процессе оценивания технического состояния объекта, и уменьшить избыточность обрабатываемой диагностической информации.

Ключевые слова: техническое состояние; диагностический признак; квазиортогональные матрицы.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно из [1], проверки диагностических признаков (ДП) являются основным инструментом в процессе определения технического состояния (ТС) объекта любым из возможных методов. При малом числе выполняемых проверок не гарантируется требуемая точность определения ТС, а при большом их числе затраты на контроль и диагностирование значительно возрастают. В связи с этим выбор минимально необходимого числа проверок для определения технического состояния представляет практически значимую задачу. Кроме того, требуется упорядочение выбранных проверок по очередности их выполнения в соответствии с определенными требованиями. Обе эти задачи обычно решаются вместе.

С позиций технической диагностики выбор минимального состава проверок представляет собой задачу построения минимальных диагностических тестов. При этом целью решения такой задачи является снижение затрат на диагностирование. Такая задача заключается в определении состава измеряемых параметров (контрольных точек), обеспечивающих наблюдаемость ТС объекта [1]. Техническое состояние объекта считается наблюдаемым, если оно различимо с другими его ТС на множестве выбранных ДП.

На практике в качестве ДП используются выходные параметры всех функциональных элементов объекта. Формируемое при этом исходное множество ДП заведомо обеспечивает попарную различимость всех заданных ТС. При этом возникает определенная избыточность диагностической информации. В связи с наличием указанной избыточности часть зарегистрированной измерительной информации, получаемой при выполнении проверок, не используется. Это дает основание для возможности сокращения размерности исходного признакового пространства, достигаемого выбором таких признаков, которые гарантированно обеспечивают попарную различимость ТС объекта. Сами признаки при этом не меняются, уменьшается только их количество. При этом новый набор признаков – это подмножество, выделенное из их исходного множества.

В работе [1] предложен способ уменьшения количества анализируемых ДП, имеющих бинарную форму представления. Для этого используется система ортогональных двоичных векторов, представляющая собой совокупность строк матрицы Адамара, размерность которой равна числу заданных технических состояний объекта.

Однако этот способ имеет существенный недостаток, связанный с размерностью N матрицы Адамара, пропорциональной степеням числа 2, т. е. $N = 2^k$ ($k = 1; 2; 3; \dots$). Этот способ также неприменим, если модельные значения признаков в заданных технических состояниях объекта могут принимать больше двух возможных значений.

Для преодоления данных недостатков предлагается использовать известные квазиортогональные матрицы [2], которые, во-первых, имеют другие размерности, а во-вторых, применимы при использовании ДП, имеющих 3 или 4 возможных значения.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для формальной постановки задачи выбора ДП будем считать заданными множество $S = \{S_i \mid i = \overline{1, m}\}$ технических состояний (ТС) объекта, а также множество $\Pi = \{\pi_j \mid j = \overline{1, n}\}$ диагностических признаков (параметров), информативных для распознавания этих состояний, причем $n \gg m$.

Каждое техническое состояние имеет свое изображение, представляемое в виде n -мерного вектора:

$$S_{\langle n \rangle i} = [s_{i1} \quad s_{i2} \quad \dots \quad s_{ij} \quad \dots \quad s_{in}]^T \quad (i = \overline{1, m}),$$

где s_{ij} – это модельное (наиболее вероятное) значение j -го диагностического признака π_j в i -м техническом состоянии S_i .

Набор векторов $S_{\langle n \rangle i} \ (i = \overline{1, m})$ образует некоторое пространство S , которое удобно представить в виде таблицы состояний или матрицы $S_{[m, n]}$, т. е.

$$S_{[m, n]} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \dots & s_{1j} & \dots & s_{1n} \\ s_{21} & s_{22} & \dots & s_{2j} & \dots & s_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ s_{i1} & s_{i2} & \dots & s_{ij} & \dots & s_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ s_{m1} & s_{m2} & \dots & s_{mj} & \dots & s_{mn} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

строками которой являются транспонированные векторы $S_{\langle n \rangle i} \ (i = \overline{1, m})$ изображений (образов) соответствующих технических состояний.

Для определения ТС, в котором находится объект, необходимо выполнить проверки некоторого количества диагностических признаков $\pi_j \in \Pi$. Множество $\hat{\Pi} = \{\hat{\pi}_j \mid j = \overline{1, n}\}$ этих проверок находится во взаимно однозначном соответствии с множеством $\Pi = \{\pi_j \mid j = \overline{1, n}\}$ диагностических признаков. Проверка $\hat{\pi}_j$ соответствующего признака π_j представляет собой процесс сопоставления измеренного значения y_j признака π_j с одним из модельных значений $s_{ij} \in S_{[m, n]}$.

Каждое модельное значение s_{ij} представляет собой обозначение (наименование) некоторого интервала, имеющего левую и правую границы, в который должно попадать измеряемое значение y_j диагностического признака π_j , если объект находится в техническом состоянии S_i .

Если осуществляется допусковый контроль по принципу «норма – не норма», то число возможных градаций модельных значений s_{ij} равно двум, т. е., например, +1 и –1.

Если для каждого диагностического признака $\pi_j \in \Pi$ задано некоторое число интервалов, внутри которых изменение признака не учитывается, то число возможных градаций модельных значений s_{ij} равно количеству этих интервалов.

Для решения задачи сокращения размерности исходного признакового пространства необходимо найти отображение:

$$\varphi: \mathbf{S} \rightarrow \mathbf{S}^*, \quad (2)$$

позволяющее преобразовать исходное евклидово пространство \mathbf{S} в другое евклидово пространство \mathbf{S}^* , которое состоит из векторов $S_{\langle m \rangle i}^*$ ($i = \overline{1, m}$) размерностью $m < n$. Каждый из этих векторов является «сжатым» эталонным изображением (образом) технического состояния S_i , а в совокупности они формируют квадратную матрицу $\mathbf{S}_{[m]}^*$, схожую с матрицей (1), но имеющую меньшую размерность.

Основное требование при реализации отображения (2) сводится к обеспечению заданного уровня точности определения технических состояний объекта.

Снижение затрат на контроль и диагностирование является основной целью уменьшения размерности исходного признакового пространства при соблюдении указанного ограничения.

Если для любой пары изображений $(S_{\langle m \rangle i}^*, S_{\langle m \rangle f}^*) \in \mathbf{S}^* (i; f = \overline{1, m}, i \neq f)$ найдется такая проверка $\hat{\pi}_j \in \hat{\Pi}^*$, что $|s_{ij} - s_{jf}| \geq \delta_j$, где δ_j – минимально допустимое значение разброса параметра π_j при переходе объекта из ТС S_i в ТС S_f , то на подмножестве проверок $\hat{\Pi}^* \subset \hat{\Pi}$ множество технических состояний $\mathbf{S} = \{S_i | i = \overline{1, m}\}$ будет различимым.

Подмножество $\hat{\Pi}^* \subset \hat{\Pi}$ выбираемых проверок в общем случае должно удовлетворять следующим условиям:

$$\hat{\Pi}^* = \left\{ \hat{\pi}_j \mid \hat{\pi}_j \in \hat{\Pi}, \forall S_{\langle m \rangle i}^*, S_{\langle m \rangle f}^* \in \mathbf{S}^* (i; f = \overline{1, m}, i \neq f) s_{ij} \neq s_{jf} \right\}; \quad (3)$$

$$\text{card}\{\hat{\Pi}^*\} = m. \quad (4)$$

Это означает, что для любой пары изображений $(S_{\langle m \rangle i}^*, S_{\langle m \rangle f}^*)$ в подмножестве $\hat{\Pi}^*$, состоящем из m элементов (по числу рассматриваемых технических состояний), должна существовать хотя бы одна проверка, при выполнении которой ТС S_i и S_f будут различимы между собой. Подмножество $\hat{\Pi}^*$, удовлетворяющее условиям (3) и (4), не обязательно является единственным. Из них можно выбрать такое, которое содержит или самые «дешевые», или самые точные проверки в зависимости от заданных ограничений.

ОПИСАНИЕ ИЗВЕСТНЫХ КВАЗИОРТОГОНАЛЬНЫХ МАТРИЦ

Квазиортогональные матрицы – это квадратные матрицы, ортогональные по строкам и столбцам, элементы которых имеют относительно простые значения [3].

В соответствии с [4] будем полагать, что квадратная матрица $\mathbf{A}_{[m]}$ порядка m с ограниченными по модулю элементами $|a_{ij}| \leq 1$ является квазиортогональной, если она удовлетворяет условию

$$\mathbf{A}_{[m]}^T \mathbf{A}_{[m]} = \omega(m) \mathbf{I}_{[m]}, \quad (5)$$

где $\omega(m)$ – весовая функция (вес матрицы);

$\mathbf{I}_{[m]}$ – единичная матрица.

Если $\omega(m) = 1$, то матрица $\mathbf{A}_{[m]}$ является ортогональной. К простейшим среди квазиортогональных относятся матрицы Адамара $\mathbf{H}_{[m]}$ с элементами 1 и -1 и весом $\omega(m) = m$.

Ортогональные по строкам (столбцам) квадратные матрицы, содержащие небольшое количество различных по значению элементов (уровней), называются критскими матрица-

ми [5]. Двухуровневые критские матрицы состоят из элементов $a = 1$ и $-b$ ($b \leq 1$), причем значение b зависит от размерности матрицы.

Описание семейств известных критских матриц с количеством уровней от двух до трех, сведено в табл. 1 [5].

Таблица 1

Значения уровней критских матриц

Символ	Порядок m	Матрица	Значения элементов
H	$4t$	Адамара	1; -1
C	$2t, 4t$	Белевича	1; -1; 0
W	$t, 2t, 3t, 4t$	Себерри (взвешенная)	1; -1; 0
M	$4t - 1$	Мерсенна	1; $-b$, где $b = \frac{t}{t + \sqrt{t}}$
E	$4t - 2$	Эйлера	1; $-b$, где $b = \frac{t}{t + \sqrt{2t}}$
Z	$4t - 3$	Зейделя	1; $-b; d$, где $b = 1 - 2d; d = \frac{1}{1 + \sqrt{m}}$
F	$4t + 1$	Ферма	1; $-b; s$, где $b = \frac{2m - p}{p}; p = q + \sqrt{q};$ $q = m - 1; s = \frac{\sqrt{mq} - 2\sqrt{q}}{p}$

Для использования в практических приложениях ограничимся рассмотрением квазиортогональных матриц, имеющих размерность $m = \overline{4, 20}$. В рамках этого диапазона приведем портреты некоторых двухуровневых квазиортогональных матриц, причем для удобства их графического представления вместо положительных элементов ($a = 1$) будем использовать белый квадрат, а вместо отрицательных ($-b$) – черный.

В частности, на рис. 1 и 2 приведены портреты матриц Мерсенна $M_{[7]}$, $M_{[11]}$, $M_{[15]}$ и $M_{[19]}$.

Можно утверждать [6], что матрицы Мерсенна представляют собой некоторую альтернативу матрицам Адамара на нечетных порядках, поскольку из матрицы $M_{[4t-1]}$ можно построить матрицу $H_{[4t]}$. Так, из матрицы $M_{[11]}$ достаточно просто формируется матрица $H_{[12]}$, изображенная на рис. 3, у которой черный квадрат обозначает элемент, равный -1, а белый – +1.

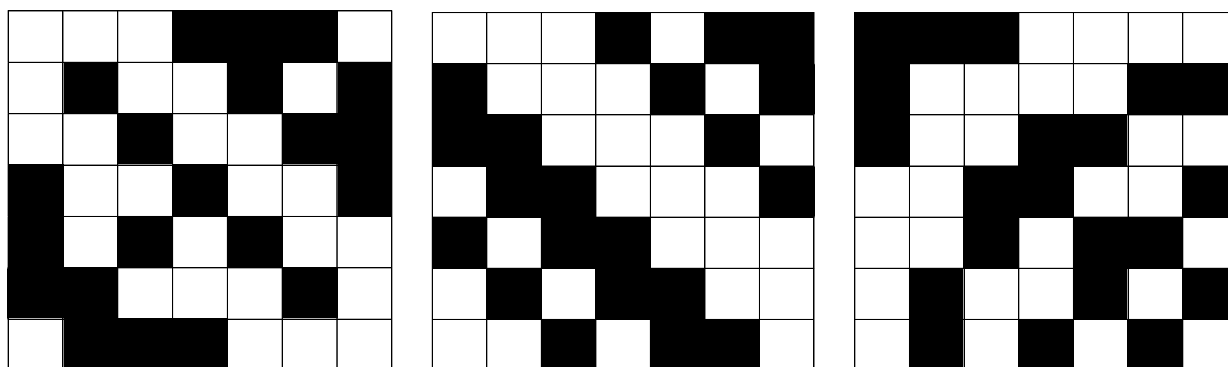


Рис. 1. Портреты матриц Мерсенна $M_{[7]}$; $a = 1; -b = -\frac{2}{2 + \sqrt{2}}$

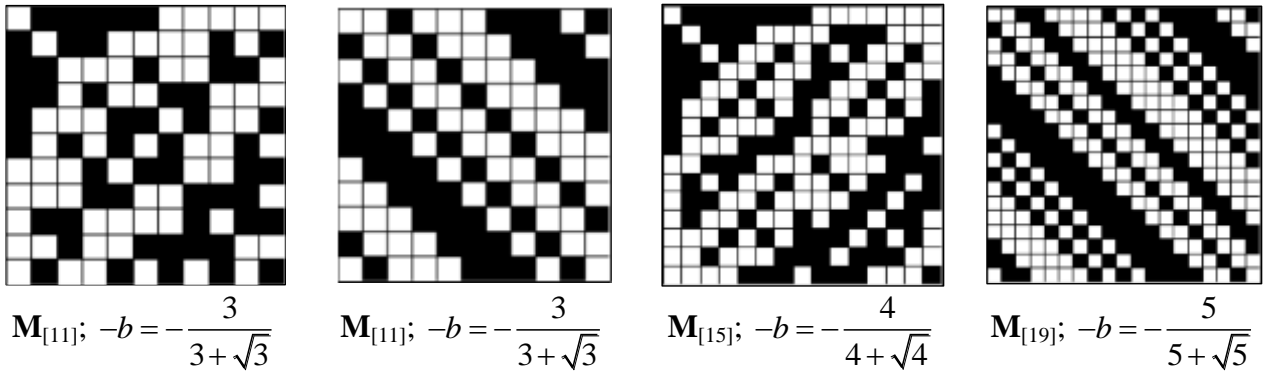


Рис. 2. Портреты матриц Мерсенна $M_{[11]}$, $M_{[15]}$ и $M_{[19]}$; $a = 1$

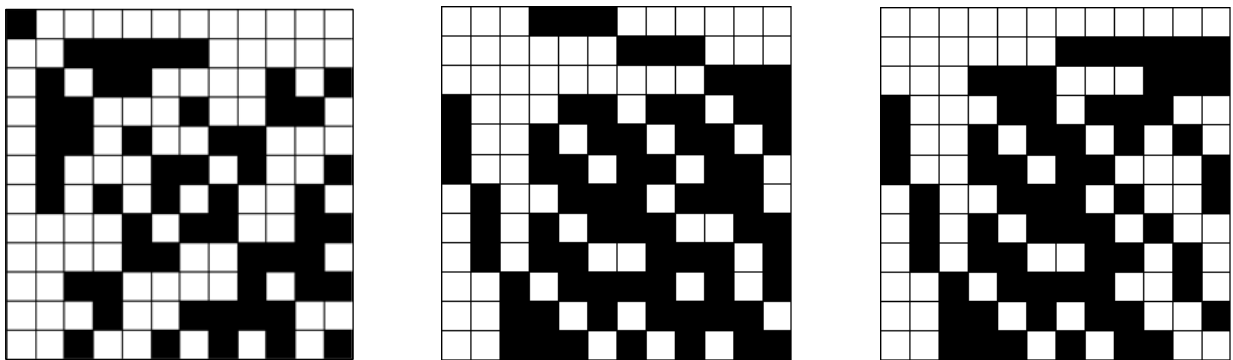


Рис. 3. Портреты матриц Адамара $H_{[12]}$

Рассмотрим также некоторые трехуровневые матрицы. Например, на рис. 4 приведены портреты матриц Белевича $C_{[6]}$, $C_{[10]}$ и $C_{[14]}$, у которых черным цветом закрашены элементы, имеющие значение -1, белый цвет соответствует элементам, равным 1, а серый – нулевым элементам.

На рис. 5 представлены портреты трехуровневой матрицы Ферма $F_{[5]}$, а также матриц Зейделя $Z_{[5]}$ и $Z_{[9]}$.

Матрица Ферма имеет элементы $a = 1$ (белый цвет), $-b = -0,6667$ (черный цвет) и $s = 0,6667$ (серый цвет). Матрицы Зейделя $Z_{[5]}$ и $Z_{[9]}$ содержат, соответственно, элементы: $a = 1$ (белый цвет); $-b = -0,38197$ и $-b = -0,5$ (черный цвет); $d = 0,30917$ и $d = 0,25$ (серый цвет).

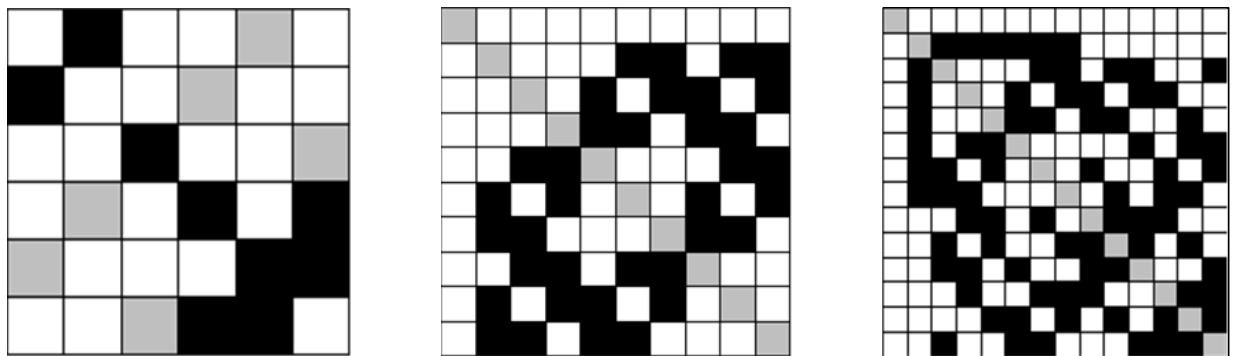


Рис. 4. Портреты матриц Белевича $C_{[6]}$, $C_{[10]}$ и $C_{[14]}$

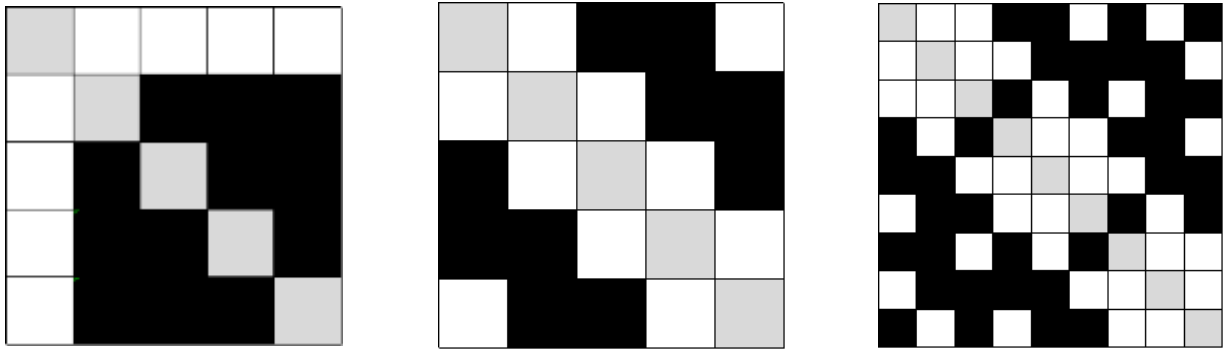


Рис. 5. Портреты матриц Ферма $F_{[5]}$, Зейделя $Z_{[5]}$ и $Z_{[9]}$

Таким образом, при решении поставленной задачи можно использовать как двухуровневые, так и трехуровневые квазиортогональные матрицы различных размерностей. В табл. 2 для рассматриваемого диапазона размерностей квазиортогональных матриц обобщены результаты проведенного анализа, показывающие, какие из матриц можно использовать для формирования минимизированного описания классов технических состояний объекта в зависимости от их числа и количества градаций значений ДП, описывающих эти состояния.

Таблица 2

Анализ возможности использования квазиортогональных матриц

Матрица (число уровней)	Размерность матрицы																
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Адамара (2)	+				+				+				+				+
Мерсенна (2)				+				+				+				+	
Белевича (3)	+		+		+		+		+		+		+		+		
Ферма (3)		+				+				+				+			
Зейделя (3)		+				+				+				+			

АЛГОРИТМ ВЫБОРА ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМЫ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ВЕКТОРОВ

Как известно, система ортогональных векторов обладает оптимальными свойствами с точки зрения качества распознавания технических состояний, описываемых этими векторами.

Пусть тем или иным способом получены элементы множества $S = \{s_{ij} \mid i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}\}$

модельных значений признаков $p_j \in \Pi$ в ТС $S_i \in S$, которые описывают m классов состояний объекта и представлены в виде исходной таблицы (матрицы) состояний $S_{[m, n]}$ вида (1).

Каждая строка $S_{<n>i} (i = \overline{1, m}; m < n)$ матрицы $S_{[m, n]}$, являющаяся n -мерным вектором, представляет собой эталонное описание ТС $S_i \in S$.

Если существует квазиортогональная матрица $A_{[m]}$ порядка m с количеством уровней, совпадающим с числом градаций элементов матрицы $S_{[m, n]}$, то можно выбрать из матрицы $S_{[m, n]}$ такие столбцы, которые имеют наибольшее сходство со столбцами матрицы $A_{[m]}$. Из выбранных таким образом столбцов матрицы $S_{[m, n]}$ можно составить квадратную матрицу $S^*_{[m]}$ почти идентичную матрице $A_{[m]}$.

Вероятность полного совпадения матриц $S^*_{[m]}$ и $A_{[m]}$ достаточно мала, но поскольку строки матрицы $A_{[m]}$ являются ортогональными, то строки матрицы $S^*_{[m]}$ будут похожими на ортогональные, т. е.

$$S_{(m)i}^* \times S_{(m)f}^{*\top} = \sum_{j: \hat{\pi}_j \in \hat{\Pi}^*} s_{ij} \cdot s_{fj} \approx 0 \quad \left(i, f = \overline{1, m} \right). \quad (6)$$

Обозначим через $d(S_{\langle m \rangle j}, A_{\langle m \rangle k})$ меру сходства между столбцами матриц $S_{[m,n]}$ и $A_{[m]}$, имеющими номера j и k , соответственно, и будем вычислять ее по формуле

$$d(S_{(m)j}, A_{(m)k}) = (S_{(m)j} \times A_{(m)k}^{\top}) = \sum_{i=1}^m s_{ij} a_{ik}. \quad (7)$$

Тогда в искомое подмножество $\hat{\Pi}^*$ будут включены проверки $\hat{\pi}_j \in \hat{\Pi}$ с номерами, соответствующими номерам столбцов матрицы $S_{[m,n]}$, из которых составлена матрица $S_{[m]}^*$. Условие для формирования подмножества $\hat{\Pi}^*$ можно представить в двух эквивалентных формах:

$$\hat{\Pi}^* = \left\{ \hat{\pi}_j \mid \hat{\pi}_j \in \hat{\Pi}, \forall k = \overline{1, m} \exists j \in \{ \overline{1, n} \} : d(S_{(m)j}, A_{(m)k}) = \max_{l=1, n} d(S_{(m)l}, A_{(m)k}) \right\}; \quad (8)$$

$$\hat{\Pi}^* = \left\{ \hat{\pi}_j \mid \hat{\pi}_j \in \hat{\Pi}, \forall k = \overline{1, m} \exists j \in \{ \overline{1, n} \} : q_{kj} = \max_{l=1, n} q_{kl} \right\}, \quad (9)$$

где $q_{kj} (k = \overline{1, m}; j = \overline{1, n})$ – элементы так называемой матрицы отбора $Q_{[m,n]}$, вычисляемой по формуле

$$Q_{[m,n]} = A_{[m]}^{\top} S_{[m,n]}. \quad (10)$$

Другими словами, номера столбцов, в которых располагаются имеющие максимальное значение элементы каждой строки матрицы $Q_{[m,n]}$, будут соответствовать номерам проверок, включаемых в подмножество $\hat{\Pi}^*$.

Если окажется, что несколько элементов в какой-либо строке матрицы $Q_{[m,n]}$ имеют одинаковое максимальное значение, то следует выбрать ту проверку, стоимость выполнения которой меньше. При отсутствии сведений о стоимости проверок, можно выбрать любую одну из них.

Последовательная процедура выбора ДП, проверка которых обеспечивает возможность попарной различимости заданных технических состояний, заключается в выполнении ряда операций.

1. Выберем модель объекта анализа, в которой выделены m классов технических состояний и n диагностических признаков, описываемых матрицей $S_{[m,n]}$ вида (1).

2. В зависимости от числа строк матрицы $S_{[m,n]}$ и количества градаций (числа уровней) модельных значений ДП выберем с помощью табл. 1 и 2 подходящую квазиортогональную матрицу $A_{[m]}$. Используя формулу (5), проверим, что выбранная матрица $A_{[m]}$ удовлетворяет условиям ортогональности ее строк (столбцов).

3. Вычислим по формуле (10) матрицу отбора $Q_{[m,n]}$.

4. Выделим в каждой строке полученной матрицы $Q_{[m,n]}$ элемент с максимальным значением и определим номера проверок, которые будут входить в искомое подмножество $\hat{\Pi}^*$ согласно условию (9).

5. Составим минимизированное описание классов технических состояний объекта в виде матрицы $S_{[m]}^*$, включая в нее столбцы матрицы $S_{[m,n]}$, соответствующие номерам столбцов матрицы $Q_{[m,n]}$, выбранных по условию (9). Полученная матрица $S_{[m]}^*$ в наибольшей степени близка к матрице $A_{[m]}$.

6. Проверим близость строк (столбцов) матрицы $S_{[m]}^*$ к ортогональным, используя формулу (6).

Строки сформированной матрицы $S_{[m]}^*$ представляют собой «сжатые» эталонные образы (изображения) классов технических состояний, полное описание которых дают строки матрицы $S_{[m,n]}$.

Столбцы, входящие в состав матрицы $S_{[m]}^*$, могут располагаться в произвольном порядке, также как и столбцы в квазиортогональной матрице $A_{[m]}$. Следует только строго соблюдать согласование номеров столбцов в матрице $S_{[m]}^*$ с номерами проверок ДП, выбираемых из матрицы $S_{[m,n]}$.

Пример 1. Составим минимизированное описание классов технических состояний объекта, модель которого задана в виде табл. 3 и содержит множество $S = \{S_i | i = \overline{1,7}\}$ технических состояний, а также множество $\Pi = \{\pi_j | j = \overline{1,14}\}$ диагностических признаков.

Таблица 3

Исходное описание классов технических состояний объекта

	π_1	π_2	π_3	π_4	π_5	π_6	π_7	π_8	π_9	π_{10}	π_{11}	π_{12}	π_{13}	π_{14}
S_1	-0,518	1,067	1,045	1,092	-0,593	-0,631	-0,690	1,031	1,097	0,996	1,063	1,013	-0,604	1,097
S_2	0,994	1,064	-0,677	1,085	1,044	1,079	-0,658	-0,668	1,008	-0,690	-0,583	1,019	-0,568	1,036
S_3	1,030	1,063	1,036	-0,540	-0,550	-0,537	1,047	0,993	-0,572	-0,645	-0,586	1,052	1,012	1,032
S_4	-0,619	-0,660	-0,511	1,049	1,084	1,062	1,069	0,993	-0,662	-0,654	0,997	1,074	1,079	1,003
S_5	1,040	-0,581	1,013	-0,639	-0,645	1,077	-0,652	1,041	-0,550	1,051	1,028	-0,676	-0,547	-0,627
S_6	1,033	-0,687	-0,567	1,072	1,076	-0,548	-0,666	-0,638	1,060	1,097	1,095	-0,533	0,993	-0,500
S_7	-0,591	1,014	1,031	-0,506	-0,563	1,064	1,067	-0,548	1,026	1,044	1,002	1,031	1,100	-0,615

Решение. Анализ табл. 3 показывает, что поскольку модельные значения ДП имеют два уровня (≈ 1 и $\approx -0,6$), то для решения задачи можно использовать матрицу Мерсенна $M_{[7]}$ (см. рис. 1) с элементами $a = 1$ и $-b = -\frac{2}{2+\sqrt{2}} \approx -0,58579$, т. е.

$$M_{[7]} = \begin{vmatrix} 1 & -0,58579 & -0,58579 & -0,58579 & 1 & 1 & 1 \\ -0,58579 & 1 & -0,58579 & 1 & 1 & -0,58579 & 1 \\ -0,58579 & -0,58579 & 1 & 1 & -0,58579 & 1 & 1 \\ -0,58579 & 1 & 1 & -0,58579 & 1 & 1 & -0,58579 \\ 1 & 1 & -0,58579 & 1 & -0,58579 & 1 & -0,58579 \\ 1 & -0,58579 & 1 & 1 & 1 & -0,58579 & -0,58579 \\ 1 & 1 & 1 & -0,58579 & -0,58579 & -0,58579 & 1 \end{vmatrix}$$

Убедимся, что матрица $M_{[7]}$ действительно является квазиортогональной, для чего воспользуемся выражением (5):

$$M_{[7]}^T M_{[7]} = \begin{vmatrix} 5,0294 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5,0294 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5,0294 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5,0294 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5,0294 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5,0294 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5,0294 \end{vmatrix}$$

Используя формулу (10), построим матрицу отбора $Q_{[7,14]}$:

$$Q_{[7,14]} = \begin{matrix} & \pi_1 & \pi_2 & \pi_3 & \pi_4 & \pi_5 & \pi_6 & \pi_7 & \pi_8 & \pi_9 & \pi_{10} & \pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{13} & \pi_{14} \\ \begin{matrix} 0,141 \\ -0,081 \\ -0,035 \\ 5,109 \\ 0,024 \\ 0,092 \\ 0,063 \end{matrix} & \begin{matrix} -0,046 \\ -0,008 \\ -0,178 \\ 0,027 \\ -0,092 \\ 0,074 \\ 5,337 \end{matrix} & \begin{matrix} 2,611 \\ -0,031 \\ 0,180 \\ -0,112 \\ -2,514 \\ 2,708 \\ 2,473 \end{matrix} & \begin{matrix} 0,085 \\ 0,038 \\ 0,174 \\ 0,020 \\ 5,285 \\ -0,005 \\ 0,263 \end{matrix} & \begin{matrix} -1,649 \\ 0,959 \\ 1,161 \\ 0,967 \\ 3,641 \\ -1,616 \\ -1,549 \end{matrix} & \begin{matrix} 0,022 \\ 5,287 \\ 0,148 \\ 0,195 \\ 0,022 \\ 0,037 \\ 0,043 \end{matrix} & \begin{matrix} -1,795 \\ 1,007 \\ 3,689 \\ -1,776 \\ -1,801 \\ 0,925 \\ 0,912 \end{matrix} & \begin{matrix} 0,114 \\ 0,006 \\ -0,022 \\ -0,137 \\ -0,152 \\ 0,925 \\ -0,010 \end{matrix} & \begin{matrix} 2,765 \\ -0,106 \\ -0,059 \\ 0,090 \\ 2,559 \\ -2,499 \\ 2,648 \end{matrix} & \begin{matrix} 5,353 \\ -0,097 \\ 0,047 \\ 0,001 \\ -0,100 \\ -0,102 \\ -0,170 \end{matrix} & \begin{matrix} 4,289 \\ 1,523 \\ 1,625 \\ -0,840 \\ 1,726 \\ 1,615 \\ -0,932 \end{matrix} & \begin{matrix} -1,007 \\ 1,551 \\ 1,830 \\ -0,964 \\ 1,749 \\ 1,574 \\ 4,194 \end{matrix} & \begin{matrix} 0,050 \\ 0,243 \\ 5,191 \\ -0,033 \\ -0,017 \\ 0,047 \\ 0,047 \end{matrix} & \begin{matrix} -2,444 \\ -0,157 \\ 0,038 \\ 0,071 \\ 2,759 \\ 2,551 \\ 2,623 \end{matrix} \end{matrix}$$

и выберем в каждой ее строке элемент, имеющий максимальное значение (выделены прямоугольниками). Этим элементам соответствуют следующие признаки исходной матрицы $S_{[7,14]}$: π_{10} , π_6 , π_{13} , π_1 , π_4 , π_8 и π_2 . Проверки именно этих признаков будут входить в искомое подмножество $\hat{\Pi}^*$ согласно условию (9).

Теперь составим минимизированное описание классов технических состояний объекта в виде матрицы $S_{[7]}^*$, включая в нее столбцы матрицы $S_{[7,14]}$, соответствующие номерам столбцов матрицы $Q_{[7,14]}$, выбранных по условию (9). В результате получим

$$S_{[7]}^* = \begin{matrix} & \pi_{10} & \pi_6 & \pi_{13} & \pi_1 & \pi_4 & \pi_8 & \pi_2 \\ \begin{matrix} 0,996 \\ -0,69 \\ -0,645 \\ -0,654 \\ 1,051 \\ 1,097 \\ 1,044 \end{matrix} & \begin{matrix} -0,631 \\ 1,079 \\ -0,537 \\ 1,062 \\ 1,077 \\ -0,548 \\ 1,064 \end{matrix} & \begin{matrix} -0,604 \\ -0,568 \\ 1,012 \\ 1,079 \\ -0,547 \\ 0,993 \\ 1,1 \end{matrix} & \begin{matrix} -0,518 \\ 0,994 \\ 1,03 \\ -0,619 \\ 1,04 \\ 1,033 \\ -0,591 \end{matrix} & \begin{matrix} 1,092 \\ 1,085 \\ -0,54 \\ 1,049 \\ -0,639 \\ 1,072 \\ -0,506 \end{matrix} & \begin{matrix} 1,031 \\ -0,668 \\ 0,993 \\ 0,993 \\ 1,041 \\ -0,638 \\ -0,548 \end{matrix} & \begin{matrix} 1,067 \\ 1,064 \\ 1,063 \\ -0,66 \\ -0,581 \\ -0,687 \\ 1,014 \end{matrix} \end{matrix}$$

Для проверки близости строк матрицы $S_{[7]}^*$ к ортогональным используем формулу (6), т. е.

$$S_{\langle 7 \rangle i}^* \times S_{\langle 7 \rangle f}^{*\Gamma} = \sum_{j \in \{1;2;4;6;8;10;13\}} s_{ij} s_{jf} \approx 0 \quad \left(i, f = \overline{1,7} \right)_{i \neq f}$$

Полученные результаты представлены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты проверки на ортогональность

$S_{\langle 7 \rangle 1}^* \times S_{\langle 7 \rangle 2}^{*\Gamma}$	0,0915	$S_{\langle 7 \rangle 2}^* \times S_{\langle 7 \rangle 4}^{*\Gamma}$	0,1416	$S_{\langle 7 \rangle 3}^* \times S_{\langle 7 \rangle 7}^{*\Gamma}$	0,06668
$S_{\langle 7 \rangle 1}^* \times S_{\langle 7 \rangle 3}^{*\Gamma}$	0,12	$S_{\langle 7 \rangle 2}^* \times S_{\langle 7 \rangle 5}^{*\Gamma}$	-0,2255	$S_{\langle 7 \rangle 4}^* \times S_{\langle 7 \rangle 5}^{*\Gamma}$	-0,0307
$S_{\langle 7 \rangle 1}^* \times S_{\langle 7 \rangle 4}^{*\Gamma}$	-0,188	$S_{\langle 7 \rangle 2}^* \times S_{\langle 7 \rangle 6}^{*\Gamma}$	-0,0271	$S_{\langle 7 \rangle 4}^* \times S_{\langle 7 \rangle 6}^{*\Gamma}$	0,077
$S_{\langle 7 \rangle 1}^* \times S_{\langle 7 \rangle 5}^{*\Gamma}$	-0,086	$S_{\langle 7 \rangle 2}^* \times S_{\langle 7 \rangle 7}^{*\Gamma}$	0,11139	$S_{\langle 7 \rangle 4}^* \times S_{\langle 7 \rangle 7}^{*\Gamma}$	0,2557
$S_{\langle 7 \rangle 1}^* \times S_{\langle 7 \rangle 6}^{*\Gamma}$	0,0834	$S_{\langle 7 \rangle 3}^* \times S_{\langle 7 \rangle 4}^{*\Gamma}$	0,02392	$S_{\langle 7 \rangle 5}^* \times S_{\langle 7 \rangle 6}^{*\Gamma}$	0,144
$S_{\langle 7 \rangle 1}^* \times S_{\langle 7 \rangle 7}^{*\Gamma}$	-0,025	$S_{\langle 7 \rangle 3}^* \times S_{\langle 7 \rangle 5}^{*\Gamma}$	0,02256	$S_{\langle 7 \rangle 5}^* \times S_{\langle 7 \rangle 7}^{*\Gamma}$	0,191
$S_{\langle 7 \rangle 2}^* \times S_{\langle 7 \rangle 3}^{*\Gamma}$	0,19644	$S_{\langle 7 \rangle 3}^* \times S_{\langle 7 \rangle 6}^{*\Gamma}$	-0,2871	$S_{\langle 7 \rangle 6}^* \times S_{\langle 7 \rangle 7}^{*\Gamma}$	0,1546

Как видно из табл. 4, строки матрицы $S_{[7]}^*$ достаточно близки к ортогональным, поскольку для 48% полученных результатов отклонение от нуля по модулю составляет менее 0,1; для 38% это отклонение лежит в диапазоне [0,1; 0,2); для 14% – в диапазоне [0,2; 0,3).

Пример 2. Составим минимизированное описание классов технических состояний объекта, модель которого задана в виде табл. 5 и содержит множество $S = \{S_i | i = \overline{1,6}\}$ технических состояний, а также множество $\Pi = \{\pi_j | j = \overline{1,18}\}$ диагностических признаков.

Таблица 5

Исходное описание классов технических состояний объекта

	π_1	π_2	π_3	π_4	π_5	π_6	π_7	π_8	π_9
S_1	-1,039	1,033	-0,09	-0,01	1,091	-0,993	0,08	0,99	-1,091
S_2	-1,025	0,062	-1,066	0,078	1,047	-0,002	1,005	1,051	-1,056
S_3	-1,062	1,065	-1,008	0	-0,033	1,02	-1,035	-1,006	-0,996
S_4	-1,011	-1,089	-1,065	1,018	-1,075	-1,056	0,999	1,026	0,036
S_5	-0,038	1,079	-1,073	1,056	-1,009	0,069	-1,056	1,082	-0,011
S_6	0,049	-1,099	-1,009	0,999	0,995	1,032	0,085	0,027	-0,056

	π_{10}	π_{11}	π_{12}	π_{13}	π_{14}	π_{15}	π_{16}	π_{17}	π_{18}
S_1	-1,068	-1,041	1,086	1,028	0,01	-0,014	1,07	1,06	-1,096
S_2	1,078	0,095	1,096	-1,051	1,013	0,031	-1,059	1,074	-1,062
S_3	0,994	-1,014	-1,09	0,08	1,096	-0,078	1,088	0,011	1
S_4	0,067	0,041	-1,032	-0,052	0,991	-1,019	1,02	1,004	1,092
S_5	1,033	1,065	1,071	-1,098	-1,018	-1,091	-0,019	1,095	0,024
S_6	1,061	1,017	1,045	1,001	-1,011	-1,096	1,083	0,087	-0,059

Решение. Анализ табл. 5 показывает, что поскольку модельные значения ДП имеют три уровня (≈ 1 ; ≈ -1 и ≈ 0), то для решения задачи можно использовать матрицу Белевича $C_{[6]}$ (см. рис. 4), т. е.

$$C_{[6]} = \begin{vmatrix} 1 & -1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & -1 & 1 & -1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 0 & -1 & -1 & 1 \end{vmatrix}$$

Убедимся, что матрица $C_{[6]}$ действительно является квазиортогональной, для чего используем формулу (5):

$$C_{[6]}^T C_{[6]} = \begin{vmatrix} 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5 \end{vmatrix}$$

Построим матрицу отбора $Q_{[6,18]}$, используя формулу (10). Вследствие большого количества ее столбцов представим эту матрицу в виде двух частей, как показано на рис. 6.

$$Q_{[6,18]} = \begin{matrix} \pi_1 & \pi_2 & \pi_3 & \pi_4 & \pi_5 & \pi_6 & \pi_7 & \pi_8 & \pi_9 \\ \begin{matrix} -2,038 & -0,152 & -2,106 & 1,929 & -0,069 & 0,005 & -0,876 & -0,014 & -1,051 \\ -1,037 & 0,074 & -4,066 & 2,143 & -0,091 & 3,112 & -1,081 & 0,164 & -1,028 \\ -2,051 & 0,02 & -2,286 & 2,142 & 0,087 & -3,002 & 2,063 & \boxed{5,155} & -1,126 \\ -1,177 & \boxed{5,365} & -0,097 & -0,971 & 0,129 & 0,12 & -3,095 & 0,013 & -2,078 \\ -3,109 & 0,058 & -1,057 & -0,959 & -0,047 & -1,139 & 1,94 & -0,038 & -1,949 \\ -0,966 & 0,006 & -0,027 & -1,007 & \boxed{5,217} & 1,024 & 1,227 & -0,04 & -2,228 \end{matrix} \\ \pi_{10} & \pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{13} & \pi_{14} & \pi_{15} & \pi_{16} & \pi_{17} & \pi_{18} \\ \begin{matrix} -0,024 & -1,092 & -1,087 & 3,108 & 0,073 & -2,238 & \boxed{5,32} & 1,088 & 1,999 \\ \boxed{5,234} & 2,204 & 1,036 & -2,096 & 0,07 & -2,22 & 0,023 & 1,207 & 0,999 \\ 0,116 & 1,174 & 3,311 & -1,253 & -0,1 & -2,015 & -0,076 & 4,222 & -2,042 \\ -0,169 & -2,048 & 1,054 & -0,939 & 0,108 & 0,932 & 0,036 & 1,075 & -1,105 \\ 0,045 & -2,96 & -3,142 & -0,926 & \boxed{5,129} & 1,121 & -0,015 & 0,907 & 1,065 \\ -0,029 & -1,035 & 3,188 & 2,128 & 0,039 & 1,031 & 0,093 & 0,122 & -3,333 \end{matrix} \end{matrix}$$
Рис. 6. Матрица отбора $Q_{[6,18]}$

На рис. 6 для каждой из строк матрицы отбора прямоугольниками выделены элементы, имеющие максимальное значение. Этим элементам соответствуют следующие признаки исходной матрицы $S_{[6,18]}$: π_{16} , π_{10} , π_8 , π_2 , π_{14} и π_5 . Искомое подмножество $\hat{\Pi}^*$ будет, согласно условию (9), сформировано из проверок именно этих признаков.

Теперь составим минимизированное описание классов технических состояний объекта в виде матрицы $S_{[6]}^*$, включая в нее столбцы матрицы $S_{[6,18]}$, соответствующие номерам столбцов матрицы $Q_{[6,18]}$, выбранных по условию (9). В результате получим

$$S_{[6]}^* = \begin{matrix} \pi_{16} & \pi_{10} & \pi_8 & \pi_2 & \pi_{14} & \pi_5 \\ \begin{matrix} 1,07 & -1,068 & 0,99 & 1,033 & 0,01 & 1,091 \\ -1,059 & 1,078 & 1,051 & 0,062 & 1,013 & 1,047 \\ 1,088 & 0,994 & -1,006 & 1,065 & 1,096 & -0,033 \\ 1,02 & 0,067 & 1,026 & -1,089 & 0,991 & -1,075 \\ -0,019 & 1,033 & 1,082 & 1,079 & -1,018 & -1,009 \\ 1,083 & 1,061 & 0,027 & -1,099 & -1,011 & 0,995 \end{matrix} \end{matrix}$$

Проверим близость строк матрицы $S_{[6]}^*$ к ортогональным, используя формулу (6), т. е.

$$S_{\langle 6 \rangle i}^* \times S_{\langle 6 \rangle f}^{*T} = \sum_{j \in \{2;5;8;10;14;16\}} s_{ij} s_{fj} \approx 0 \quad (i, f = \overline{1,6}),$$

и сведем в табл. 6 результаты расчетов.

Таблица 6

Результаты проверки на ортогональность

$S_{\langle 6 \rangle 1}^* \times S_{\langle 6 \rangle 2}^{*T}$	-0,0275	$S_{\langle 6 \rangle 2}^* \times S_{\langle 6 \rangle 3}^{*T}$	0,0038	$S_{\langle 6 \rangle 3}^* \times S_{\langle 6 \rangle 5}^{*T}$	-0,0157
$S_{\langle 6 \rangle 1}^* \times S_{\langle 6 \rangle 3}^{*T}$	0,1817	$S_{\langle 6 \rangle 2}^* \times S_{\langle 6 \rangle 4}^{*T}$	-0,1188	$S_{\langle 6 \rangle 3}^* \times S_{\langle 6 \rangle 6}^{*T}$	-0,1056
$S_{\langle 6 \rangle 1}^* \times S_{\langle 6 \rangle 4}^{*T}$	-0,2523	$S_{\langle 6 \rangle 2}^* \times S_{\langle 6 \rangle 5}^{*T}$	0,2501	$S_{\langle 6 \rangle 4}^* \times S_{\langle 6 \rangle 5}^{*T}$	0,0608
$S_{\langle 6 \rangle 1}^* \times S_{\langle 6 \rangle 5}^{*T}$	-0,0488	$S_{\langle 7 \rangle 2}^* \times S_{\langle 7 \rangle 6}^{*T}$	-0,0253	$S_{\langle 6 \rangle 4}^* \times S_{\langle 6 \rangle 6}^{*T}$	0,3287
$S_{\langle 6 \rangle 1}^* \times S_{\langle 6 \rangle 6}^{*T}$	-0,0074	$S_{\langle 6 \rangle 3}^* \times S_{\langle 6 \rangle 4}^{*T}$	0,1060	$S_{\langle 6 \rangle 5}^* \times S_{\langle 6 \rangle 6}^{*T}$	-0,0559

Как видно из табл. 6, строки матрицы $S_{[6]}^*$ достаточно близки к ортогональным, поскольку для 53% полученных результатов отклонение от нуля по модулю составляет менее 0,1; для 26% это отклонение лежит в диапазоне [0,1; 0,2); для 21% – в диапазоне [0,2; 0,33).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, одним из путей, используемых для упрощения и удешевления процессов контроля и диагностирования сложных объектов, уменьшения количества применяемых при этом измерительно-преобразовательных устройств и снижения избыточности анализируемой диагностической информации, является выбор минимально необходимого числа проверок диагностических признаков, обеспечивающих полную наблюдаемость технических состояний, на основе системы ортогональных векторов. Однако при таком подходе не определяется очередность выполнения проверок, что не обеспечивает оптимальность процесса определения технического состояния.

Список используемых источников

1. *Дмитриев А.К., Юсупов Р.М.* Идентификация и техническая диагностика: учебник для вузов. – Л.: МО СССР, 1987. – 521 с.
2. Математическая сеть имени Леонарда Эйлера с поддержкой on line вычислений физико-математической литературы. – URL: <https://www.mathscinet.ru> (дата обращения: 10.05.2021).
3. *Балонин Н.А., Сергеев М.Б., Суздаль В.С.* Динамические генераторы квазиортогональных матриц семейства Адамара // Труды СПИИРАН. – 2017. – Вып. 5(54). – С. 224–243.
4. *Балонин Н.А., Сергеев М.Б.* Матрицы Мерсенна и Адамара // Информационно-управляющие системы. – 2016. – № 1. – С. 2–15.
5. *Балонин Н.А., Сергеев М.Б.* Матрицы Мерсенна и Адамара, произведения // Информационно-управляющие системы. – 2016. – № 5. – С. 2–14.
6. О взаимосвязях квазиортогональных матриц, построенных на известных последовательностях чисел / Ю.Н. Балонин [и др.] // Труды СПИИРАН. – 2017. – Вып. 1(50). – С. 209–223.

С.Н. Краснощеков,
кандидат военных наук, старший научный сотрудник;
В.И. Половников,
доктор технических наук, профессор

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ИЗ БОЛЬШИХ И МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА НИЗКИХ КРУГОВЫХ ОРБИТАХ

Представлена методика расчета параметров космической системы из больших и малых космических аппаратов на низких круговых орбитах. Рассматриваемая космическая система предназначена для наблюдения поверхности земного шара и нижних слоев околоземного космического пространства малыми космическими аппаратами (МКА) наблюдения и большими КА, движущимися на низких круговых или околокруговых орбитах, с минимальным количеством КА в системе, состоящей из двух плоскостей.

Ключевые слова: малый космический аппарат, околоземное космическое пространство, наземный пункт приема информации (НППИ), командная радиолиния, центр обработки специальной информации (ЦОСИ).

ВВЕДЕНИЕ

Любая система КА, как больших, так и малых, предназначенная для сбора информации о происходящем на поверхности земного шара или в околоземном слое ближнего космоса, должна иметь в своем составе [1, 2, 3]:

- КА, наблюдающие за изменениями на поверхности земного шара и в околоземном космическом пространстве (ОКП), имеющие на своем борту аппаратуру наблюдения (оптическую, радиотехническую, радиолокационную и др.) для сбора необходимой информации;
- КА-ретрансляторы, которые по линиям внутрисистемной связи получают собранную информацию и передают ее на наземные пункты приема информации (НППИ), когда находятся в зоне их видимости;
- НППИ, по командной радиолинии (КРЛ) передающий на борт КАР необходимые команды для КАР и для КА-наблюдателей (КАН), а по другим каналам – полученную специальную информацию в центр обработки специальной информации (ЦОСИ);
- ЦОСИ, передающий полученную обработанную информацию заинтересованным в ней организациям.

Анализ показывает, что наличие в целевой орбитальной группировке МКА добавляет космическим системам следующие качественно новые возможности [4, 5]:

- многопозиционность, многодиапазонность и одновременность наблюдения объекта с нескольких МКА;
- возможность комплексирования информации, получаемой от разнородных бортовых комплексов специальной аппаратуры МКА, приводящая к повышению информативности наблюдения и обеспечению требуемой достоверности распознавания объектов;
- обеспечение непрерывности наблюдения за счет возможности «передачи эстафеты» наблюдения последовательно входящим в зону видимости цели другим МКА орбитальной группировки.

Такая система сбора и передачи специальной информации, как правило, подчиняется определенным требованиям, которые определяются заинтересованными в этой информации организациями.

К таким требованиям, прежде всего, относят:

- точность получения информации бортовой аппаратурой КАН (чем меньше расстояние между КАН и объектом наблюдения, тем лучше);

- оперативность передачи информации по линиям связи «КАН-КАР», «КАР-НППИ», «НППИ-ЦОСИ» и «ЦОСИ-Заказчик» (чем короче отрезок времени передачи информации, тем лучше);
- достоверность полученной заказчиком информации (минимальное количество сбоев при передаче информации);
- стоимость системы сбора и передачи специальной информации;
- и другие требования.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для обеспечения выполнения вышеперечисленных требований ставится задача разработки методики определения баллистической структуры и расчета параметров космической системы из больших и малых КА. С целью подтверждения корректности предложенной методики провести расчет параметров баллистической структуры орбитальной группировки, состоящей из больших и малых КА (рис. 1).

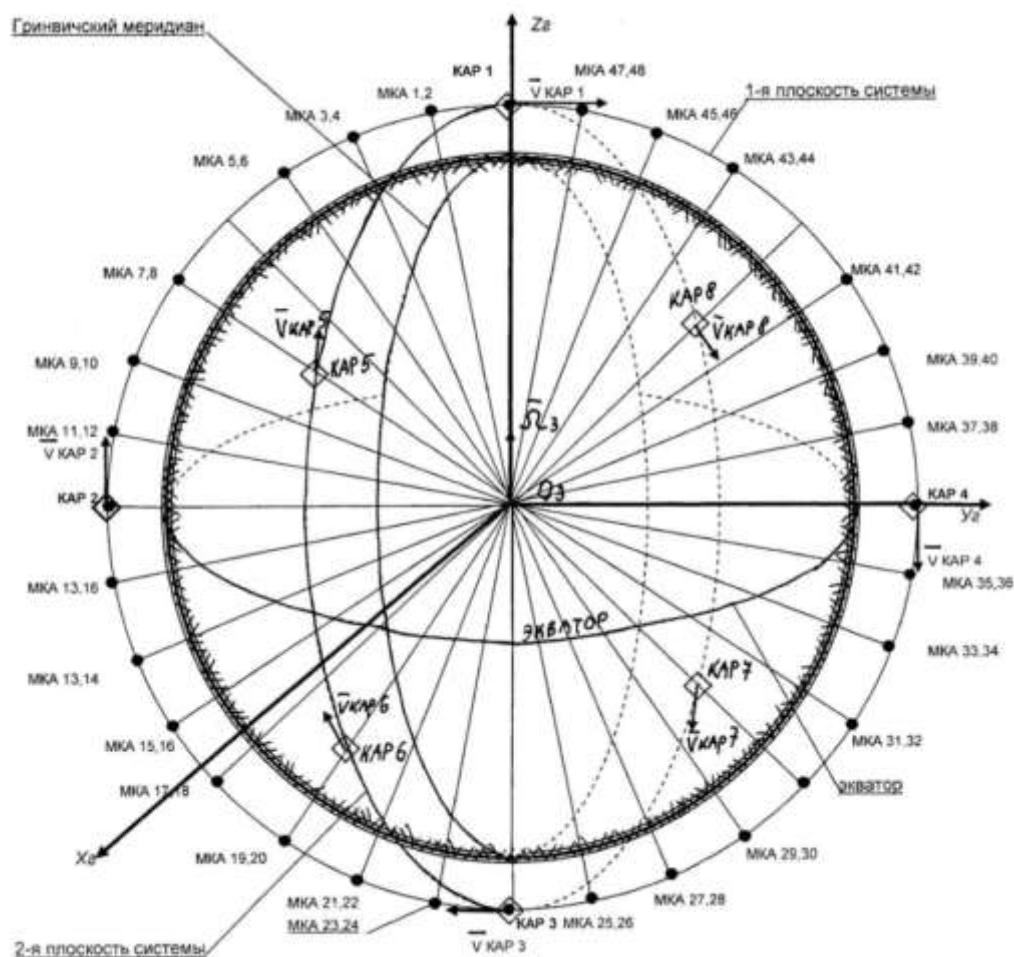


Рис. 1. Общий вид космической системы

Орбитальная группировка имеет две плоскости, в каждой из которых находятся 4 КАР и 48 малых КА, с определением минимально допустимой высоты целевого функционирования КА.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ИЗ БОЛЬШИХ И МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА НИЗКИХ КРУГОВЫХ ОРБИТАХ

Известно [3, 7], что наиболее подходящей орбитальной системой для наблюдения поверхности Земли или приземного слоя является система, построенная на круговых полярных орбитах (наклонение плоскостей орбит КАР и КАН $i_{КАР} = i_{КАН} = 90^\circ$).

Минимально возможная высота орбит КА с учетом передачи информации с КАН на КАР и с КАР на НППИ в любое время за минимальные промежутки времени возможна в случае, если все КАР находятся на круговой орбите, высота которой позволяет каждому из четырех КАР плоскости системы видеть друг друга, т. е. иметь прямую видимость соседних КАР с любого из КАР плоскости системы. Прямая видимость КАР позволяет передавать информацию без помех и задержек по времени со всех КАР плоскости системы (рис. 2). Создание плоскости орбиты КАР и МКА для наблюдения поверхности Земли показано на рис. 2. КАР располагаются в плоскости системы на угловых расстояниях $\Delta u = 90^\circ$, имея прямую видимость между собой.

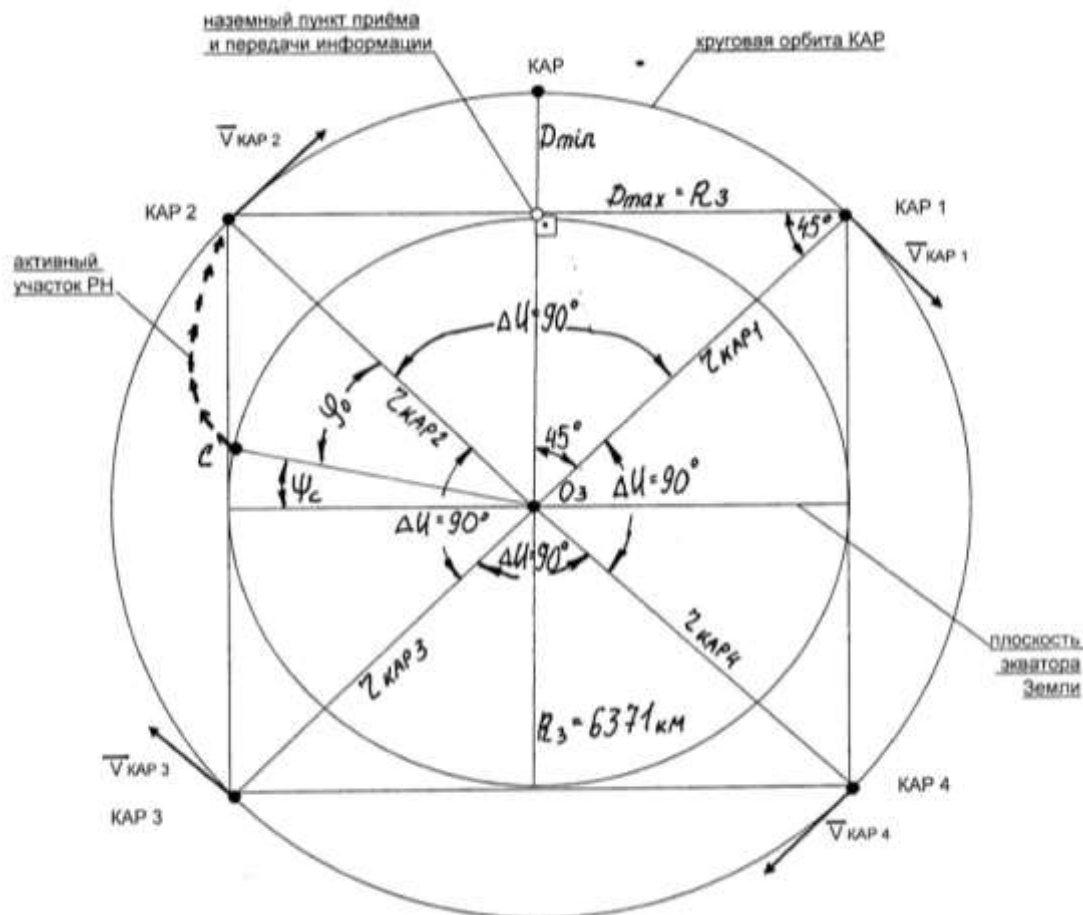


Рис. 2. Геометрическое построение плоскости космической системы

Из треугольника O_3 -НППИ-КАР1 (рис. 2) следует, что $r_{КАР}^2 = R_3^2 + R_3^2$, т. е. радиус минимальной орбиты КАР, вычисляемый по формуле

$$r_{КАР} = \sqrt{2 \cdot R_3^2}, \quad (1)$$

равен $r_{КАР} \approx 1,41 \cdot 6371 = 6583 \text{ км}$.

Таким образом, высота круговой орбиты КАР ($H_{\text{КАР}}$) над поверхностью Земного шара радиуса $R_3 = 6371$ км [7], вычисляемая по формуле

$$H_{\text{КАР}} = r_{\text{КАР}} - R_3, \quad (2)$$

составляет $H_{\text{КАР}} \approx 6583 - 6371 \approx 212$ км.

Если НППИ находится в плоскости орбиты КАР, то минимальная дальность между КАР и НППИ, вычисляемая по формуле

$$D_{\min} = r_{\text{КАР}} - R_3, \quad (3)$$

составляет $D_{\min} = 212$ км (рис. 2), а максимальная дальность между ними

$$D_{\max} = R_3 = 6371 \text{ км}. \quad (4)$$

Выведение КАР совместно с МКА наблюдения производится с одного старта (точка C на рис. 2) ракетой-носителем, у которой в момент окончания активного участка t_k параметры выведения КАР соответствовали бы начальным параметрам движения КАР по заданной круговой орбите, т. е. $r_k = r_{\text{КАР}}, V_k = V_{\text{КАР}}, \Theta_k = \Theta_{\text{КАР}} \approx 0$ (угол наклона вектора скорости \bar{V}_k к местному горизонту круговой орбиты КАР в точке его выведения на круговую орбиту радиуса $r_{\text{КАР}}$).

Наклонение плоскости орбиты КАР определяется азимутом пуска РН на старте A_0 , прямое восхождение восходящего узла плоскости орбиты определяется временем пуска РН t_0 , а аргумент широты КАР $u_{\text{КАР}}$ определяется широтой точки старта РН Ψ_c и угловой дальностью активного участка РН φ_0 (см. рис. 2).

Зная точное время выведения первого КАР1 на заданную орбиту, запуск следующего КА (КАР2) в плоскость круговой орбиты КАР1 возможен только при выполнении следующих условий:

- прямое восхождение восходящего узла орбиты КАР2 (Ω_2) должно быть равно прямому восхождению восходящего узла орбиты КАР1 (Ω_1), с учетом прецессии восходящего узла орбиты КАР1 в нецентральной гравитационном поле Земли;
- аргумент широты выведения КАР2 на орбиту должен быть равен

$$u_{0\text{КАР}2} = u_{0\text{КАР}1} + \Delta u,$$

где Δu – разность аргументов широты $u_{0\text{КАР}1}$ и $u_{0\text{КАР}2}$ в момент выведения КАР2 на заданную орбиту (в нашем случае $\Delta u = u_{\text{КАР}1} - u_{\text{КАР}2} = 90^\circ$, так как плоскость системы КАР состоит из четырех КА).

Круговая скорость КАР [7] определяется из соотношения

$$V_{\text{Кр}}^{\text{КАР}} = \sqrt{\frac{k}{r_{\text{КАР}}}}, \quad (5)$$

где $k = 398600,4418 \text{ км}^3/\text{с}^2$ – гравитационная постоянная Земли [6].

Подставляя в (1) значения k и $r_{\text{КАР}} = 6583$ км, получим $V_{\text{Кр}}^{\text{КАР}} = 7,7814 \text{ км/с}$.

Зная радиус круговой орбиты $r_{\text{КАР}}$ и скорость $V_{\text{Кр}}^{\text{КАР}}$, определим период обращения КАР по круговой орбите:

$$T_{\text{КАР}} = \frac{2\pi \cdot r_{\text{КАР}}}{V_{\text{Кр}}^{\text{КАР}}}. \quad (6)$$

Для нашего случая получим $T_{\text{КАР}} = 5315,52$ с.

Отсюда легко определить угловую скорость движения КАР на круговой орбите:

$$\omega_{\text{КАР}} = \frac{2\pi}{T_{\text{КАР}}}, \quad (7)$$

т. е. $\omega_{\text{КАР}} = \frac{2 \cdot 3,141593}{5315,52} = 0,001182$ рад/с = 0,0677286 град/с.

Далее получим отрезок времени Δt_u , за который КАР переместится по своей орбите на $\Delta u = 90^\circ$, который, по сути, является максимально возможным временем непрерывной передачи информации с КАР на НППИ:

$$\Delta t_u = \frac{90^\circ}{\omega_{\text{КАР}}} = \frac{90}{0,0677286} = 1467,5 \text{ с} = 24,61 \text{ мин} = 0,4101372 \text{ ч.}$$

Для дальнейших расчетов определим количество витков, которое совершит КАР за звездные $T_{\text{Зв.}} = 86164$ с и солнечные $T_{\text{Солн.}} = 86400$ с = 24 ч (сутки).

Тогда количество витков КАР на орбите за времена $T_{\text{Зв.}}$ и $T_{\text{Солн.}}$ равно для наших данных

$$n_{\text{Зв.}} = \frac{T_{\text{Зв.}}}{T_{\text{КАР}}}, \quad n_{\text{Солн.}} = \frac{T_{\text{Солн.}}}{T_{\text{КАР}}}, \quad \text{т. е. } n_{\text{Зв.}} = 16,21 \text{ (об/сутки)} \text{ и } n_{\text{Солн.}} = 16,254 \text{ об/сутки.}$$

Умножив дробные части $n_{\text{Зв.}}$ и $n_{\text{Солн.}}$ на 360 градусов, получим:

$$\Delta u_{\text{Зв.}} = 360 \cdot 0,21 = 75,6 \text{ град}; \quad \Delta u_{\text{Солн.}} = 360 \cdot 0,254 = 91,44 \text{ град.}$$

Таким образом, если запускается КАР2 ровно через сутки (звездные или солнечные) после запуска КАР1 на орбиту по одинаковой программе выведения с одного стартового комплекса РН, то в конце выведения он будет находиться на угловом расстоянии от КАР1 $\Delta u_{\text{Зв.}} = 75,6$ град или $\Delta u_{\text{Солн.}} = 91,44$ град.

Для создания плоскости системы КАР, состоящей из четырех КАР, необходимо получить угол $\Delta u = 90$ град. Поэтому нужно уменьшить угловую скорость КАР на такую $\Delta \omega_{\text{КАР}}$, чтобы за солнечные сутки КАР сделал бы 16,25 витков по орбите радиуса $\Delta r'_{\text{КАР}}$. Радиус круговой орбиты $\Delta r'_{\text{КАР}}$ будет больше радиуса $\Delta r_{\text{КАР}}$, рассчитанного по формуле (1), так как угловая скорость КАР уменьшается при увеличении радиуса круговой орбиты КАР.

Разницу угловых скоростей КАР $\Delta \omega_{\text{КАР}} = \omega_{\text{КАР}} - \omega'_{\text{КАР}}$ определим из соотношения

$$\frac{\omega_{\text{КАР}}}{\omega'_{\text{КАР}}} = \frac{\Delta u_{\text{Солн.}}}{\Delta u'_{\text{Солн.}}}, \quad (8)$$

где $\Delta u_{\text{Солн.}} = 91,44$ град;
 $\Delta u'_{\text{Солн.}} = 90$ град;
 $\omega_{\text{КАР}} = 0,0677286$ град/с;
 $\omega'_{\text{КАР}}$ – неизвестная величина.

Если четыре КА, большой массы (в нашем случае – КАР) необходимо расставить в плоскости круговой орбиты радиуса $r_{\text{Кр}}^{\text{КАР}}$ на угловых расстояниях между ними $\Delta u_{\text{КАР}} = \frac{\pi}{2}$, то необходимо определить такой радиус круговой орбиты $r'_{\text{КАР}}$, при котором КАР будет совершать $n_1 = 16,25$ оборотов (витков) за звездные сутки, если очередные запуски КАР совершаются с одного и того же старта ровно через одни звездные сутки.

Если между очередными запусками КАР1 и КАР2 должно пройти двое звездных суток, то КАР1, запущенный на орбиту, должен совершить $n_2 = 16,125$ витка.

Если запуск очередного КАР2 будет совершаться через трое звездных суток, то запущенный на орбиту предыдущий КАР1 должен совершить $n_3 = 16,083$ витка, а если через четверо звездных суток, то $n_4 = 16,0625$ витка.

Четвертый вариант более всего подходит для практических запусков РН с КАР с одного старта, так как после запуска первого КАР необходимо подготовить старт к очередному пуску и провести подготовительные работы на РН с КАР в МИК и на стартовом комплексе.

По истечении четырех звездных суток после предыдущего старта РН с КАР, необходимо провести старт РН с КАР создаваемой системы.

Зная нужное количество витков КАР за одни звездные сутки – $n_4 = 16,0625$ витка, можно определить радиус круговой орбиты КАР $r'_{\text{КАР}}$. Для этого рассчитаем период обращения КАР нужной круговой орбиты:

$$T'_{\text{КАР}} = \frac{T_{3\text{З}}}{n_4}, \quad (9)$$

$$\text{т. е. } T'_{\text{КАР}} = \frac{86164}{16,0625} = 5364,29572 \text{ с.}$$

Поскольку период обращения КАР по орбите определяется по формуле

$$T'_{\text{КАР}} = \frac{2\pi \cdot r'^{3/2}_{\text{КАР}}}{\sqrt{k}}, \quad (10)$$

где $k = 398600,4418 \text{ км}^3/\text{с}^2$ [6], получаем

$$r'_{\text{КАР}} = \sqrt[3]{\frac{T'^2_{\text{КАР}} \cdot k}{4\pi^2}}. \quad (11)$$

Тогда для наших данных:

– радиус круговой орбиты КАР

$$r'_{\text{КАР}} = \sqrt[3]{\frac{(5364,3)^2 \cdot 398600,4418}{4\pi^2}} = 6623,203 \text{ км};$$

– высота орбиты над поверхностью земного шара радиуса $R_3 = 6371 \text{ км}$, вычисляемая по формуле

$$H'_{\text{КАР}} = r'_{\text{КАР}} - R_3, \quad (12)$$

равна $H'_{\text{КАР}} = 6623,223 - 6371 = 252,203 \text{ км}$.

Поскольку на минимально допустимой для рассматриваемой космической системы высоте $H'_{\text{КАР}} = 252,203 \text{ км}$ атмосфера Земли имеет значительную плотность [8], то КА будет тормозиться аэродинамической силой лобового сопротивления, постепенно снижаясь до критической высоты, на которой он сделает последний виток, после чего сгорит в плотных слоях атмосферы.

Промежуток времени между временем выведения КА на орбиту $t_{\text{Выв}}$ и временем входа его в плотные слои атмосферы $t(H_{\text{Вх}})$ называется временем баллистического существования КА на орбите:

$$t_{\text{Сущ}} = t(H_{\text{Вх}}) - t_{\text{Выв}}. \quad (13)$$

В нашем случае время существования КА (КАР и МКА) будет составлять величину около 30 солнечных суток, в соответствии с данными номограммы определения времени баллистического существования спутника Земли [9].

Так как орбитальная группировка КА, движущаяся по начальной круговой орбите, должна выполнять поставленную задачу ($t_{\text{работы}} > t_{\text{сущ}}$), то каждый КА этой системы должен иметь двигатель коррекции высоты и соответствующий запас топлива.

Вид плоскости системы представлен на рис. 3.

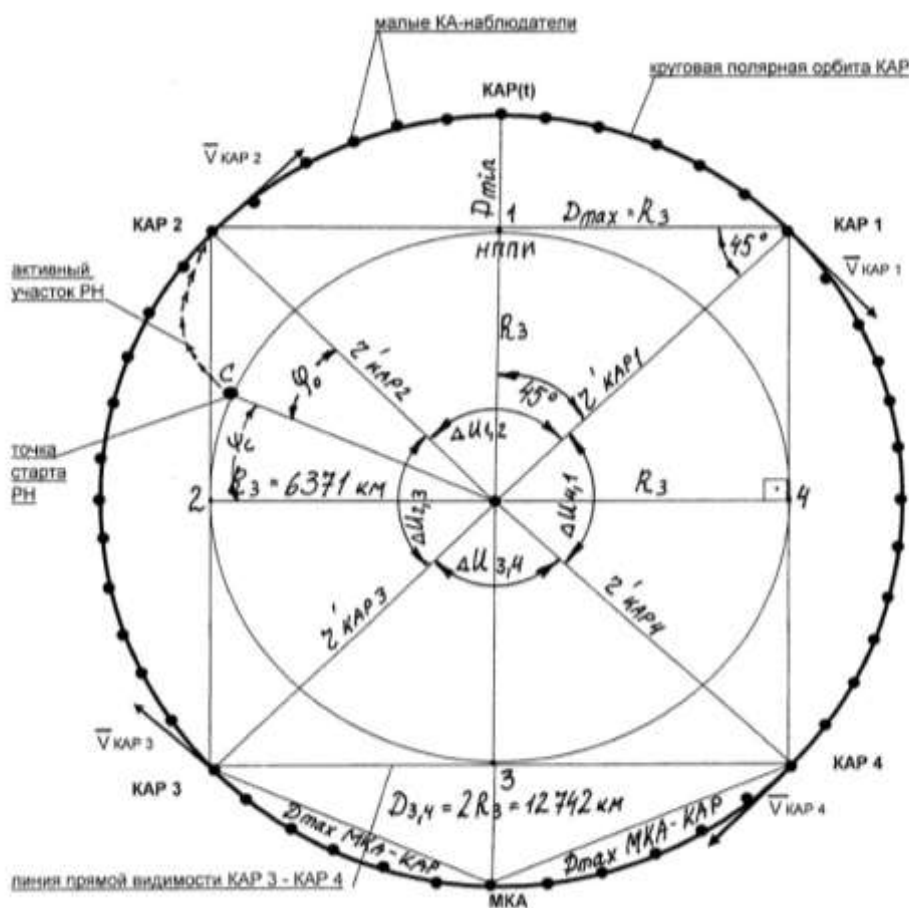


Рис. 3. Вид плоскости космической системы из больших и малых КА на полярных орбитах

На рис. 3 представлены основные геометрические величины, подтверждающие оптимальное расположение КАР и МКА для наблюдения поверхности Земли и околоземного космического пространства при минимально допустимой высоте корректного функционирования рассматриваемой космической системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развертывание орбитальной космической системы из МКА и БКА, в том числе КАР, позволит осуществить следующие задачи:

1) если в плоскости системы имеются 4 КАР, то МКА должны выполнять только две задачи: наблюдение и передачу результатов наблюдений на ближайшие КАР. КАР должны транслировать полученные данные на НППИ или на КАР, который находится в зоне видимости НППИ. Такой порядок передачи информации на НППИ освобождает МКА от непосред-

ственной передачи данных со своего борта на НППИ, что значительно упрощает бортовые системы МКА;

2) если МКА будут выводиться на орбиту вместе с бортовым оборудованием КАР, то стоимость космической системы КА резко уменьшается, поскольку для создания такой системы потребуется сделать восемь запусков КАР с МКА соответствующей РН с одного старта, расположенного на территории РФ;

3) для разведения МКА с КАР предлагается использовать платформу разведения, с которой МКА отстреливаются пороховыми (твердотопливными) шашками, присоединенными к каждому МКА, в расчетное время запуска МКА.

Список используемых источников

1. Управление космическими аппаратами зондирования Земли. Компьютерные технологии / под ред. Д.И. Козлова. – М.: Машиностроение, 1998. – 366 с.
2. *Лебедев А.А., Нестеренко О.П.* Космические системы наблюдения: синтез и моделирование. – М.: Машиностроение, 1991. – 224 с.
3. Космические системы ретрансляции информации для обеспечения функционирования ракетно-космической техники (ретроспектива, состояние и перспективы развития) / В.П. Коновалов [и др.] // Двойные технологии. – 2017. – № 4(81). – С. 40–46.
4. *Кукушкин С.С., Потюпкин А.Ю., Николаев Б.П.* Методологические основы создания малогабаритных космических аппаратов и управления многоспутниковыми группировками // Двойные технологии. – 2008. – № 2 (43). – С. 45–50.
5. *Васильев А.С., Широбоков В.В.* Планирование функционально-распределенных информационных процессов в перспективных орбитальных группировках микроспутников // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2018. – Вып. 10. – С. 525–529.
6. *Астрономический ежегодник на 2015 год.* – СПб.: ИПА РАН, 2014. – 683 с.
7. *Основы теории полета космических аппаратов* / под ред. Г.С. Нариманова. – М.: Машиностроение, 1969. – 366 с.
8. ГОСТ 4401-81. Атмосфера стандартная. Параметры. – М.: Стандартинформ, 2007. – 32 с.
9. *А.И. Беляков.* Графо-аналитический метод исследования движения космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 1973. – 148 с.

С.Н. Краснощеков,
кандидат военных наук, старший научный сотрудник;
В.И. Половников,
доктор технических наук, профессор

СПОСОБ КЛАСТЕРНОГО ВЫВЕДЕНИЯ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЕРСПЕКТИВНОЙ ПЛАТФОРМЫ РАЗВЕДЕНИЯ

Статья посвящена описанию способа кластерного выведения малых космических аппаратов с применением платформы разведения, присоединенной к космическому аппарату большой массы, который предварительно выводится ракетой-носителем на промежуточную круговую околоземную орбиту заданной высоты. Статья состоит из следующих частей: способ кластерного выведения малого космического аппарата с промежуточной круговой орбиты космического аппарата большой массы, описание платформы разведения.

Ключевые слова: малый космический аппарат, космический аппарат большой массы, платформа разведения.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время применение группировок космических аппаратов (КА) небольшой массы – малых космических аппаратов (МКА) (в отечественной классификации до 1000 кг), становится все более актуальным. Особенности подобных группировок, такие как большое количество КА и необходимость размещения нескольких КА в одной плоскости, требуют разработки новых способов выведения МКА на орбиту. На фоне возрастающей тенденции использования МКА одним из способов выведения их на орбиту является групповой (кластерный) запуск [1, 2, 3]. Групповой вывод МКА на орбиту – это задача, которая может быть решена попутным их выведением с платформы разведения (ПР), размещенной на основной полезной нагрузке космического аппарата большой массы (КА БМ). При таком запуске МКА составляют часть основной полезной нагрузки ракеты носителя (РН).

Задача состоит в том, чтобы в процессе вывода КА БМ при нахождении его на промежуточной круговой орбите все МКА распределить в плоскости промежуточной круговой орбиты КА БМ, обеспечив при этом заданные угловые расстояния между ними. Такое разведение МКА можно осуществить при реализации предложенного способа кластерного выведения МКА со специализированной ПР.

СПОСОБ КЛАСТЕРНОГО ВЫВЕДЕНИЯ МКА

В конце активного участка траектории РН при переходе на промежуточную орбиту все выводимые МКА, прикрепленные к ПР КА БМ, будут иметь одинаковую скорость движения и, следовательно, при дальнейшем их движении по орбите они не будут расходиться вдоль орбиты КА БМ, пока МКА не изменят скорость на меньшую или большую величину по сравнению со скоростью КА БМ. Отсюда следует, что для разведения МКА относительно КА БМ каждому МКА необходимо в заданные моменты времени изменить орбитальную скорость $V_{\text{МКА}}$ на величину $V_{\text{МКА}} = V_{\text{КА БМ}} \pm \Delta V_{\text{МКА}}$, где $V_{\text{КА БМ}}$ – орбитальная скорость КА БМ.

Если КА БМ движется по промежуточной орбите с круговой скоростью $V_{\text{кр}}$, то при подаче импульса скорости МКА $\overline{\Delta V_{\text{МКА}}}$ в плоскости круговой орбиты КА БМ в момент времени t_i получим:

– скорость МКА по направлению вектора скорости $\overline{V_{КА БМ}} = \overline{V_{Кр}}$

$$V_{МКА}(t_i) = V_{Кр} + \Delta V_{МКА}; \quad (1)$$

– скорость МКА против направления вектора скорости $\overline{V_{КА БМ}} = \overline{V_{Кр}}$

$$V_{МКА}(t_i) = V_{Кр} - \Delta V_{МКА}. \quad (2)$$

Поскольку вектор импульса скорости $\overline{\Delta V_{МКА}}$ направлен в плоскости горизонта КА БМ, то в первом случае мы получаем скорость МКА $V_{МКА}(t_i)$ в точке перигея эллиптической орбиты, радиус которого в момент t_i соответствует радиусу перигея новой орбиты МКА $r_{П} = r_{Кр}$. Во втором случае $V_{МКА}(t_i) < V_{Кр}$, т. е. в момент t_i скорость МКА, радиус которого $r_A = r_{Кр}$ будет соответствовать точке апогея эллиптической орбиты. Таким образом, прикладывая в разные моменты времени t_i ($i = 1, 2, \dots, k$, где k – количество МКА на борту КА БМ) импульсы скорости к МКА $\pm \Delta V_{МКА}(t_i)$, получим набор эллиптических орбит МКА, плоскости которых будут совпадать с плоскостью круговой орбиты КА БМ.

Самым неприятным обстоятельством в этом случае является то, что при движении по орбите в одной плоскости МКА может произойти столкновение с другим МКА или с КА БМ. Причем вероятность такого столкновения возрастает с увеличением количества МКА в одной плоскости.

Для ликвидации этого недостатка предлагается последовательно разводить МКА в плоскости промежуточной орбиты КА БМ с помощью ПР МКА (рис. 1), которая прикреплена к КА БМ. Для создания импульса скорости $\overline{\Delta V_{МКА}}$ предлагается использовать твердотопливные заряды, которые крепятся к МКА и работают единицы секунд, создавая требуемый импульс, рассчитанный заранее для массы каждого МКА. Для обеспечения движения МКА по орбитам, совпадающим с промежуточной круговой орбитой КА БМ с заданными угловыми расстояниями (α) между ними, необходимо рассчитать массу твердотопливного заряда (m), значение (ΔV) и направление (γ) вектора скорости для каждого МКА.

В рассматриваемом случае время горения твердотопливного заряда, тяга которого изменяет величину вектора скорости МКА на $\overline{\Delta V_{МКА}}$ и направлена под определенным углом к вектору скорости $\overline{V_{КА БМ}}$, не превышает единиц секунд и значительно меньше, чем период обращения МКА по новой орбите. Поэтому при расчете параметров разведения МКА с КА БМ воспользуемся теорией импульсных маневров [4, 5].

Как известно из курса теоретической механики [6], приложение ударного импульса к материальной точке не изменяет ее координат, но изменяет скорость точки, исходя из соотношения, которое следует из второго закона Ньютона:

$$F = m \cdot a, \quad (3)$$

где F – сила;

m – масса тела;

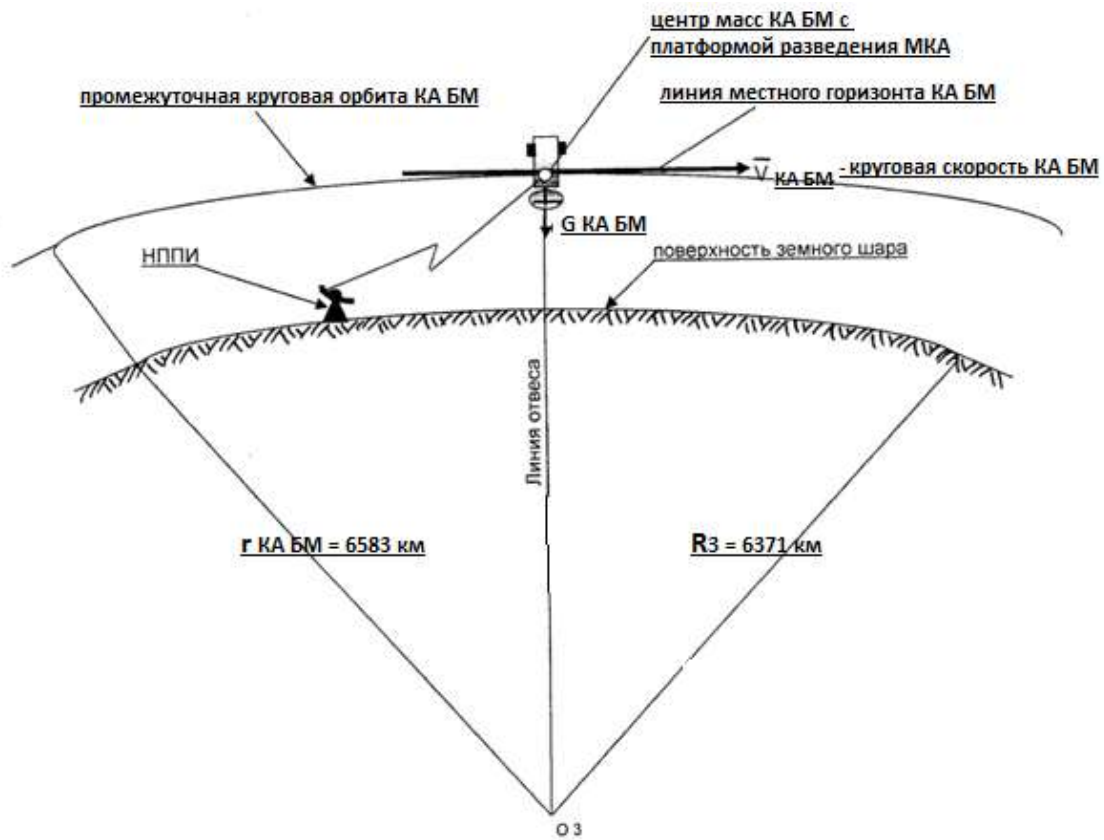
a – ускорение, $a = \frac{dV}{dt}$.

В рассматриваемом случае

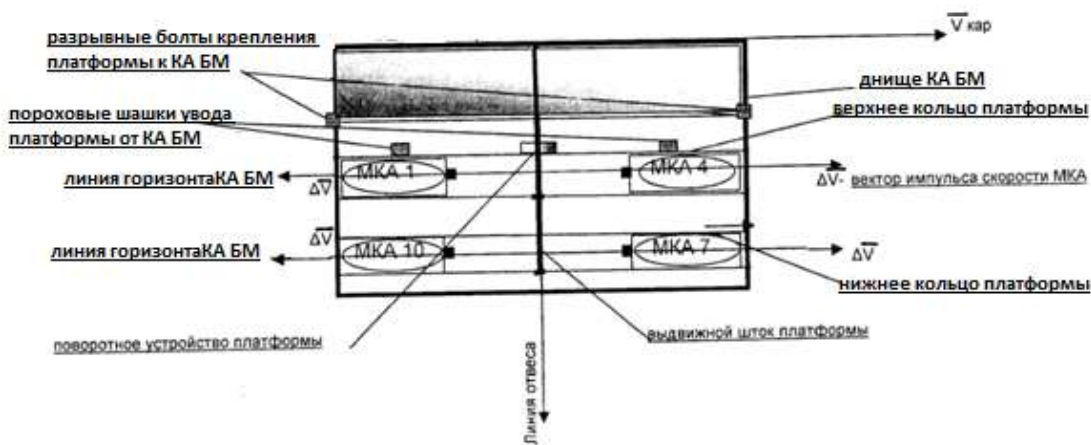
$$P \cdot \Delta t = m \cdot \Delta V, \quad (4)$$

где m – масса МКА;

- a – ускорение, $a = \frac{dV}{dt}$;
- P тяга твердотопливного заряда МКА;
- Δt – время действия тяги;
- ΔV изменение скорости МКА.



а)



б)

Рис. 1. КА БМ с ПР МКА:

а – промежуточная круговая орбита; б – схема крепления платформы разведки МКА к КА БМ

Таким образом, координаты приложения импульса тяги являются концом исходной (промежуточной круговой орбиты КА БМ) и началом новой траектории (орбиты) МКА.

Для определения расхода массы твердотопливного заряда воспользуемся формулой Циолковского, которая при мгновенном использовании топлива ($\Delta t \approx 0$) в формуле (4) дает точное значение приращения скорости МКА:

$$\Delta V = -W \cdot \ln \left(1 - \frac{\Delta m_T}{m} \right), \quad (5)$$

где Δm_T – израсходованная масса топлива для получения импульса скорости ΔV (в нашем случае это масса твердотопливного заряда);

W – скорость истечения газов.

Из формулы (5), при заданном значении импульса ΔV , получаем массу твердотопливного заряда:

$$\Delta m_T = (1 - e^{-\frac{\Delta V}{W}}) m. \quad (6)$$

Задача состоит в том, чтобы развернуть вектор скорости МКА на заданный угол α , оставив после подачи импульса скорости ΔV прежнюю скорость ($V_{\text{МКА}} = V_{\text{кр}}$).

Из геометрических соотношений на рис. 2 следует, что модуль требуемого импульса скорости ΔV для разворота вектора скорости $\overline{V_{\text{кр}}}$ на угол α равен

$$|\Delta V| = 2 \cdot V_{\text{кр}} \cdot \sin \frac{\alpha}{2}. \quad (7)$$

При этом вектор импульса скорости $\overline{\Delta V_{\text{МКА}}}$ должен быть направлен в плоскости промежуточной орбиты КА БМ под углом $\gamma = \frac{\pi - \alpha}{2}$ к вектору скорости КА БМ $\overline{V_{\text{кр}}}$.

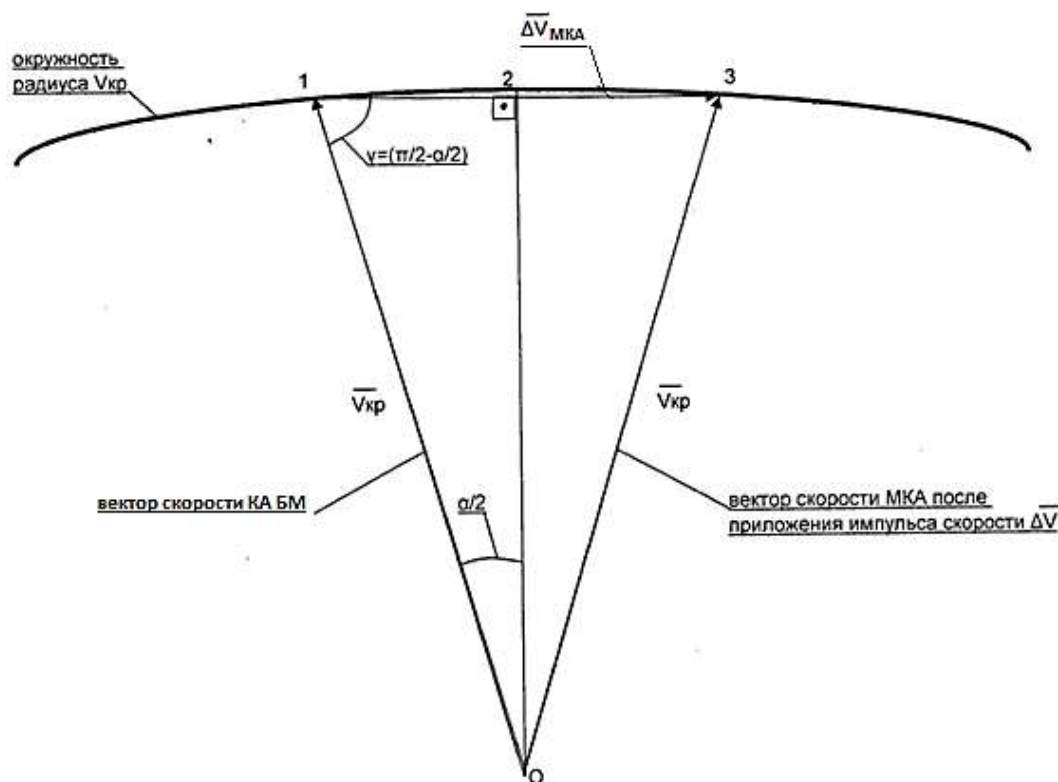


Рис. 2. Схема разворота скорости $V_{\text{кр}}$ на угол α

В качестве примера рассмотрим случай для отделения МКА массой 100 кг от ПР, расположенной на КА БМ, который движется по круговой орбите радиуса $r_{кр} = 6583$ км с круговой скоростью $V_{КА БМ} = 7781,4$ м/с и необходимым углом разворота вектора скорости МКА $\alpha = 0,5$ град в плоскости орбиты КА БМ.

Рассчитаем значение и угол разворота импульса скорости $\overline{\Delta V_{МКА}}$. Необходимый модуль импульса скорости, приложенный к МКА, равен

$$\left| \overline{\Delta V_{МКА}} \right| = 2 \cdot 7781,4 \cdot 0,004363309 \approx 67,9 \text{ м/с}, \quad (8)$$

а угол разворота вектора $\overline{\Delta V_{МКА}}$ по отношению к вектору скорости $\overline{V_{КА БМ}}$ составит величину

$$\gamma = \frac{\pi - \alpha}{2} = 90 - 0,25 = 89,75 \text{ град}. \quad (9)$$

Зная требуемое значение $\left| \overline{\Delta V_{МКА}} \right|$, по формуле (6), подставив в нее $m_{МКА} = 100$ кг и скорость истечения газов $W = 2500$ м/с твердотопливного заряда, получим массу твердотопливного заряда Δm_T , который необходимо установить на МКА:

$$\Delta m_T = 2,679 \text{ кг}.$$

В результате для каждого МКА получены все необходимые данные ($\left| \overline{\Delta V_{МКА}} \right|$, γ , Δm_T) для расчета их вывода с ПР КА БМ.

ПЛАТФОРМА РАЗВЕДЕНИЯ

Платформа разведения МКА на борту КА БМ предназначена для обеспечения выведения МКА в плоскость круговой орбиты КА БМ, который одновременно выступает в роли ведущего КА в системе МКА. При этом МКА будут разнесены относительно КА БМ на заданные угловые расстояния в плоскости круговой орбиты КА БМ. Это достигается специальной аппаратурой управления, установленной на ПР, которая через заданные промежутки времени будет посредством инициирующих устройств [7] запускать твердотопливные заряды МКА, находящиеся в стартовых каналах ПР (рис. 3). Для осуществления выведения очередные МКА заводятся в стартовые каналы ПР в строго определенные моменты времени с помощью поворотного устройства.

Необходимо отметить, что оси стартовых каналов ПР должны иметь возможность разворачиваться относительно вектора скорости КА БМ $\overline{V_{кр}}$ на малые углы (порядка 1-2 градуса) в плоскости горизонта КА БМ. Это даст возможность регулировать угол разворота (γ), что обеспечит возможность МКА после отстрела от КА БМ иметь скорость, равную скорости КА БМ, т. е. $V_{МКА} = V_{КА БМ}$ (см. рис. 2).

Платформа разведения МКА прикреплена к днищу КА БМ выдвижным штоком, который направлен по линии отвеса, отслеживаемой системой ориентации и стабилизации КА БМ. ПР МКА состоит из двух колец: верхнее и нижнее (см. рис. 1, б). Кольца (верхнее и нижнее) ПР располагаются так, что оси стартовых каналов ПР МКА параллельны вектору скорости КА БМ $\overline{V_{кр}}$ (рис. 3).

В каждом кольце располагается по 6 МКА, включая МКА, находящиеся в стартовых каналах (рис. 3). После одновременного старта МКА1 и МКА4 в стартовые каналы вводятся очередные МКА (на рисунке это МКА2 и МКА5) через открытые стенки стартовых каналов, которые после закрытия опускающихся стенок попадают в стартовые каналы, ограниченные неподвижными стенками (направляющими). Для того чтобы не вносить помехи в систему

ориентации и стабилизации КА БМ при перемещении очередных МКА в стартовые каналы, необходимо кольца ПР поворачивать с одинаковой угловой скоростью ω , создаваемой поворотным устройством. В этом случае не возникнут как момент относительно линии отвеса, так и дисбаланс вокруг линии отвеса, поскольку соблюдается симметрия расположения МКА вокруг линии отвеса.

Вид второго кольца ПР аналогичен виду первого кольца, за исключением того, что МКА с № 7–12 заводятся в стартовые каналы в противоположном направлении (против часовой стрелки). На начало времени разведения МКА с КА БМ в стартовых каналах установлены МКА № 7 (в канале № 2) и МКА № 10 (в канале № 1). После отстрела МКА № 7 и 10 в канал № 2 вводится МКА № 8, в канал № 1 – МКА № 11, в третий отстрел попадают МКА № 9 (канал № 2) и МКА № 12 (канал № 1).

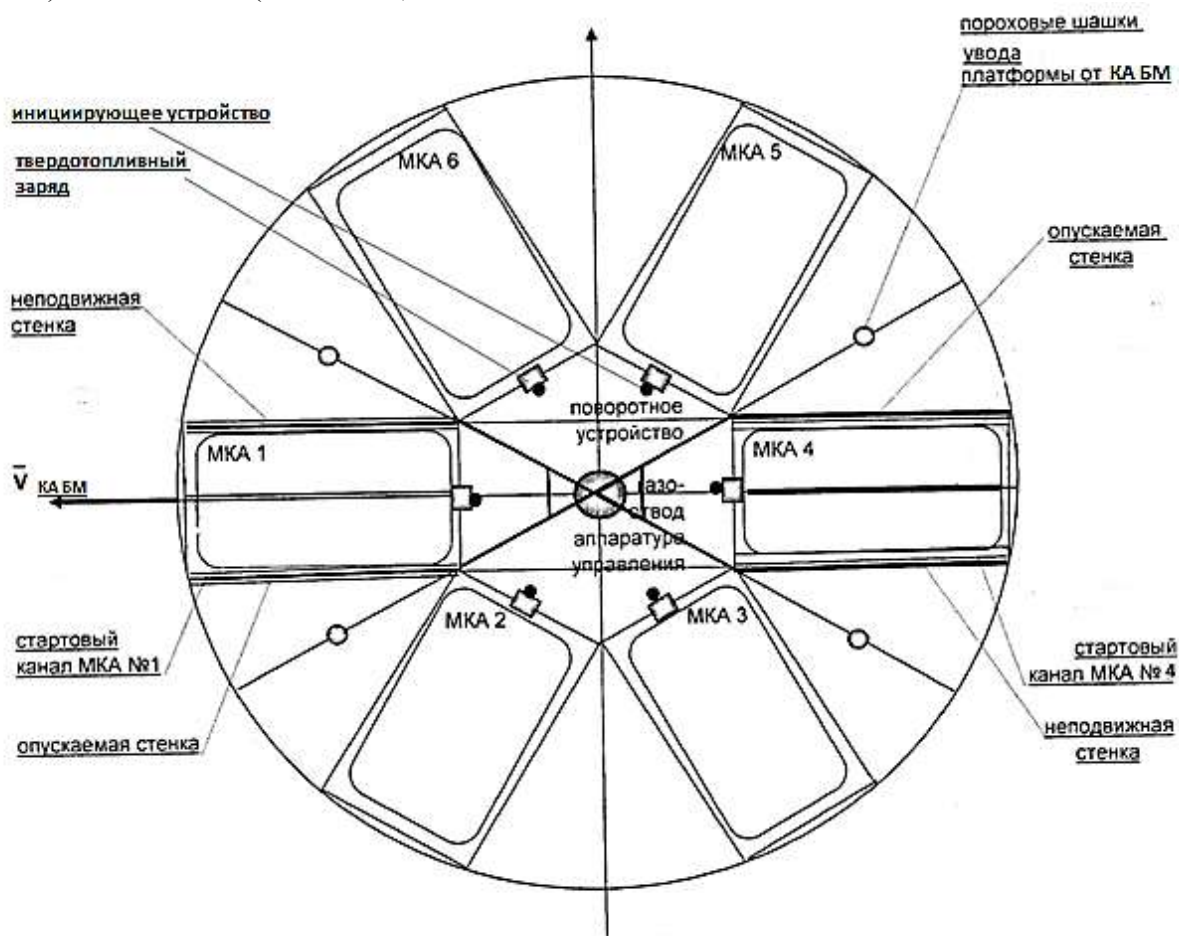


Рис. 3. Общий вид кольца ПР МКА с орбиты КАР

После вывода всех МКА (№ 1–6 в верхнем кольце ПР и № 7–12 в нижнем кольце ПР), отстреливаются разрывные болты и выдвижной шток, соединяющие платформу с днищем КА БМ. Далее запускаются пороховые шашки, уводящие ПР от КА БМ вниз по линии отвеса КА БМ (см. рис. 1,б). После освобождения КА БМ от ПР он выводится на рабочую (в частности, на геостационарную) орбиту разгонным блоком для дальнейшего функционирования по назначению.

Предлагаемая ПР МКА с КА БМ может состоять из одного кольца, в котором должно находиться четное число (2, 4, 6) МКА, или из двух колец с четным (2, 4, 6, 8, 10, 12) количеством МКА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемый способ кластерного выведения МКА может быть использован для создания группировки МКА при выводе их на орбиту в качестве попутного груза. Предлагаемое устройство ПР и способ кластерного выведения МКА в плоскости промежуточной круговой орбиты КА БМ позволят получить заданную структуру орбитальной системы МКА в одной плоскости на одном витке пролета КА БМ.

Список используемых источников

1. *Аваряскин Д.П., Белоконов И.В.* Методика выбора программы отделения группы наноспутников от космической платформы // Изв. вузов. Приборостроение. – 2018. – Т. 61, № 5. – С. 450–457.
2. *Клюшников В.Ю., Кузнецов И.И., Осадченко А.С.* Тенденции развития группировок малых КА и средств их выведения на орбиты // Сборник трудов конференции ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина. – 2015. – С. 73–79.
3. *Зельвин Д.А., Топорков А.Г.* Анализ особенностей реализации схемы полета блока выведения при запуске микрокосмических аппаратов на промежуточную орбиту с синхронной прецессией. // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2019. – Вып. 9. – URL: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-9-1918> (дата обращения: 23.07.21).
4. Основы теории полета космических аппаратов / под ред. Г.С. Нариманова. – М.: Машиностроение, 1969. – 366 с.
5. *Власов С.А., Мамон П.А.* Теория полета космических аппаратов: учебник. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2007. – 435 с.
6. *Бутенин Н.В., Луиц Я.Л., Меркин Д.Р.* Курс теоретической механики: учебник: в 2 т. – М.: Наука, 1985. – Т. II. – 496 с.
7. *Машневский В.Ф.* Руководство по подрывным работам. – М.: МО СССР, 1968. – 464 с.

В.И. Крыжановский,
кандидат технических наук, доцент;
С.В. Слатов;
И.А. Трофимов,
кандидат технических наук

ОПТИМАЛЬНОЕ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ УПРАВЛЕНИЕ В ДВУХКОНТУРНОЙ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЕ НАВЕДЕНИЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРА

Рассматривается задача формирования оптимального по быстродействию управления двухконтурной следящей системой для разворота поворотной платформы, на которой расположен оптико-электронный прибор (ОЭП). Наведение оптической оси ОЭП на объект наблюдения производится путем одновременного разворота платформы по азимуту и разворота ОЭП относительно платформы по высоте. Исследовано влияние перекрестных связей между контурами на качество процессов при оптимальном управлении.

Ключевые слова: оптимальное по быстродействию управление, наведение на цель, перекрестная связь, двухконтурная следящая система.

ВВЕДЕНИЕ

Объектом исследования является двухконтурная электромеханическая дистанционная следящая система (ЭМДСС) для управления угловым движением платформы с размещенным на ней оптико-электронным прибором. Каждый из элементов системы имеет одну степень свободы, при этом платформа вместе с ОЭП совершает угловое движение по азимуту относительно неподвижной оси вращения, а ОЭП – по высоте относительно оси, которая вращается вместе с платформой.

В работах [1, 2] была получена математическая модель движения платформы с ОЭП как объекта управления, исследовано влияние, которое оказывают перекрестные связи на угловое движение платформы и ОЭП, разработана линейная двухконтурная следящая система для наведения ОЭП на цель, в которой осуществляется компенсация влияния перекрестных связей при одновременном развороте платформы и ОЭП. Однако при решении важных прикладных задач требуется обеспечение наведения ОЭП на цель за минимальное время, что не может быть обеспечено при линейном алгоритме управления. В работах по теории автоматического управления [3] рассматривается вопрос оптимального по быстродействию управления ЭМДСС для одномерного случая. Разработка алгоритма оптимального по быстродействию управления для двухконтурных систем является актуальной и практически важной задачей.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Необходимо сформировать алгоритм оптимального по быстродействию управления угловым движением на интервале времени $t \in [0, t_k]$ в двухконтурной следящей системе по углу поворота платформы относительно корпуса КА ψ и углу поворота линии визирования ОЭП относительно платформы θ . Разворот платформы и ОЭП производится электрическими двигателями через понижающие редукторы. Как объект управления соединение двигателя, редуктора и присоединенной нагрузки представляет собой инерционное интегрирующее звено, входным сигналом которого является управляющее напряжение, а выходным – угол поворо-

та вала редуктора. Известны угловые параметры $\psi_0 = \psi(0), \dot{\psi}_0 = \dot{\psi}(0), \theta_0 = \theta(0), \dot{\theta}_0 = \dot{\theta}(0)$ платформы и линии визирования ОЭП в нулевой момент времени, а также значения угловых параметров линии направления на цель $\psi_{ц}(t_k), \theta_{ц}(t_k)$ в конечный момент времени. Предполагается, что цель неподвижна, поэтому угловые скорости линии направления на цель в конечный момент времени равны нулю.

Необходимо осуществить разворот платформы и линии визирования ОЭП за минимальное время таким образом, чтобы в момент времени t_k обеспечить выполнение граничных условий:

$$\psi(t_k) = \psi_{ц}(t_k), \theta(t_k) = \theta_{ц}(t_k), \dot{\psi}(t_k) = \dot{\theta}(t_k) = 0,$$

а также минимизировать время t_k .

ФОРМИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ АВТОНОМНЫХ РАЗВОРОТОВ

Длительность разворотов платформы и ОЭП из начальной точки в конечную точку определяется динамикой разворота электрического двигателя. Передаточная функция, описывающая зависимость угла поворота электрического двигателя от приложенного входного напряжения имеет вид

$$W(p) = \frac{k}{p(Tp + 1)} \quad (1)$$

где k – коэффициент передачи двигателя с учетом коэффициента передачи редуктора, к выходному валу которого присоединена нагрузка (платформа или ОЭП);

T – эквивалентная постоянная времени двигателя с учетом моментов инерции присоединенной нагрузки.

Поскольку знаменатель передаточной функции (1) не содержит комплексных корней, оптимальный по быстродействию угловой разворот такого объекта в соответствии с принципом максимума Понтрягина производится в течение двух интервалов. Разгон двигателя в требуемом направлении выполняется на первом интервале, на втором интервале выполняется торможение. На вход двигателя подается номинальное напряжение U_0 соответствующего знака. Динамика движения описывается соотношениями:

$$\begin{aligned} y(t) &= y(0) + T\dot{y}(0)\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) + kU_0\left[t - T\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right)\right], \\ \dot{y}(t) &= \dot{y}(0)e^{-\frac{t}{T}} + kU_0\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right), \end{aligned} \quad (2)$$

где $y(t)$ – угол поворота выходного вала редуктора.

Предполагаем, что необходимо осуществить разворот платформы из начального положения $y(0)$ в конечное положение $y(t_k) > y(0)$, известна угловая скорость платформы в начальной точке и требуемая угловая скорость в конечной точке. Для оптимального по быстродействию разворота в этом случае на интервале времени $0 - t_1$ на вход двигателя следует подавать напряжение U_0 , затем в течение времени $t_2 = t_k - t_1$ следует подавать напряжение $-U_0$. Такому развороту соответствует система уравнений:

$$\begin{aligned}
 y(t) &= y(0) + T\dot{y}(0)\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) + kU_0\left[t_1 - T\left(1 - e^{-\frac{t_1}{T}}\right)\right], \\
 y(t_k) &= y(t_1) + T\dot{y}(t_1)\left(1 - e^{-\frac{t_2}{T}}\right) - kU_0\left[t_2 - T\left(1 - e^{-\frac{t_2}{T}}\right)\right], \\
 \dot{y}(t_1) &= \dot{y}(0)e^{-\frac{t_1}{T}} + kU_0\left(1 - e^{-\frac{t_1}{T}}\right), \\
 \dot{y}(t_k) &= \dot{y}(t_1)e^{-\frac{t_2}{T}} - kU_0\left(1 - e^{-\frac{t_2}{T}}\right).
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Система уравнений (3) является нелинейной, получить ее аналитическое решение сложно, поэтому определение времени разгона t_1 и времени торможения t_2 целесообразно определять численными методами. Методом Гаусса были найдены $t_1 = 0,735$ с и $t_2 = 0,178$ с при развороте платформы из нулевого положения на угол 100° при нулевых угловых скоростях в начальной и конечной точках разворота для объекта (1) с коэффициентом передачи 3 с^{-1} и постоянной времени $0,27$ с. На рис. 1 показаны временные характеристики разворота платформы. Сплошной линией показан процесс при оптимальном по быстродействию развороте, его длительность составляет $0,913$ с. Пунктирной линией показан процесс при линейном управлении, сформированном для этого же объекта в работе [2], длительность переходного процесса равняется $2,72$ с, что почти в 3 раза больше, чем при оптимальном развороте. При работе системы по линейному алгоритму учитывалось, что напряжение на входе двигателя не должно превышать номинальное значение U_0 .

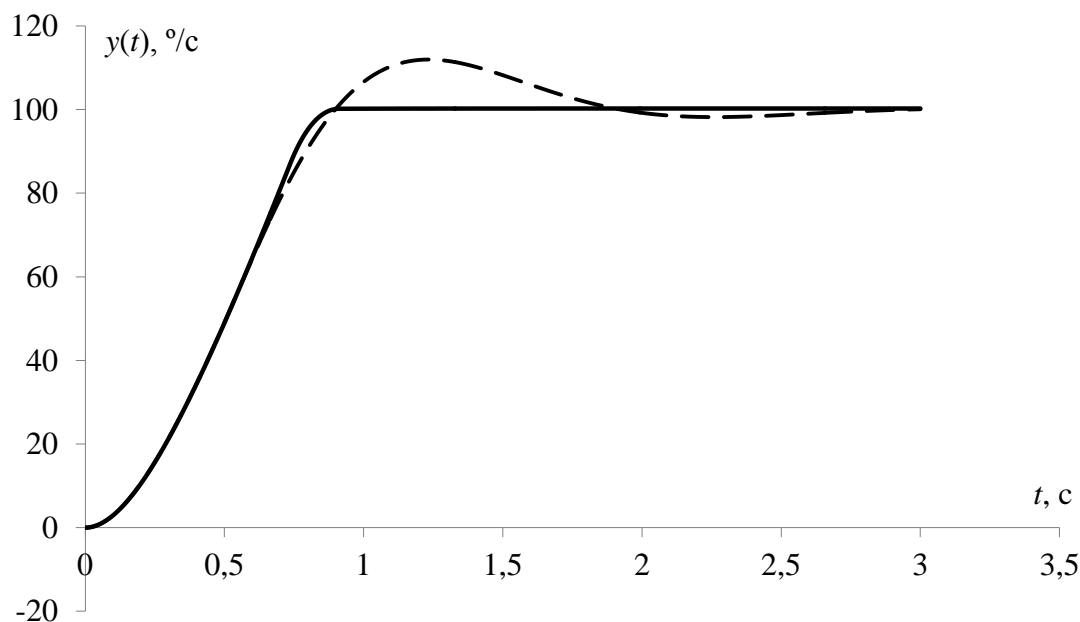


Рис. 1. Временные характеристики разворота платформы

На рис. 2 показаны соответствующие фазовые траектории.

Разворот ОЭП при неподвижной платформе описывается теми же математическими соотношениями, что и разворот платформы. Моделирование показало, что временные характеристики и фазовые траектории разворота ОЭП имеют примерно тот же вид, что и

соответствующие кривые разворота платформы, показанные на рис. 1, 2. При линейном управлении длительность переходного процесса почти в 3 раза превышает длительность при оптимальном развороте. Следовательно, применение оптимального алгоритма дает существенный выигрыш по быстродействию.

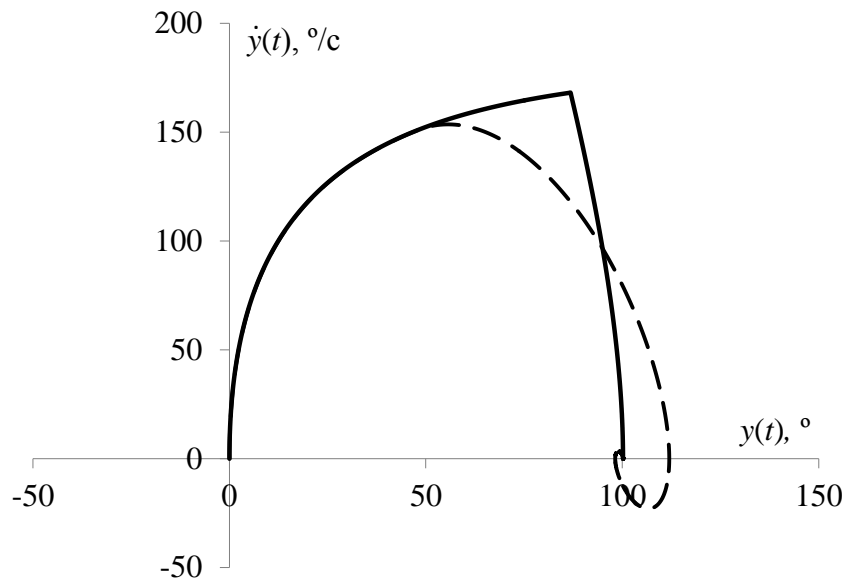


Рис. 2. Фазовые траектории разворота платформы

Сформированное выше оптимальное управление по разомкнутой схеме имеет ряд недостатков:

- сложность определения времени разгона и торможения;
- не учитывается влияние перекрестных связей при одновременном развороте платформы и ОЭП, а также возмущающих воздействий и отклонения фактических параметров от расчетных, что приводит к появлению ошибок по углу и угловой скорости в момент окончания разворота.

В литературе по теории автоматического управления известно решение для формирования управления по замкнутой схеме, которое находится путем использования метода фазовых траекторий. Возможные оптимальные фазовые траектории 1 и 2 для случая нулевой угловой скорости в конечной точке приведены на рис. 3, где тенью выделена линия переключения.

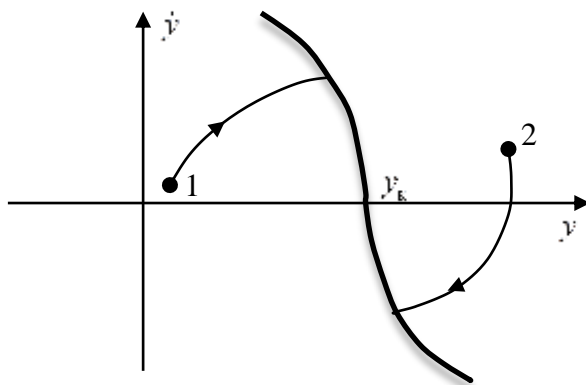


Рис. 3. Оптимальное по быстродействию управление

Если процесс начинается левее линии переключения (точка 1), на первом интервале управления на вход двигателя следует подавать напряжение U_0 , по достижении линии переключения следует подавать напряжение $-U_0$, в момент достижения конечной точки y_k входное напряжение необходимо выключить. Если движение начинается в точке 2, полярность входного напряжения на первом и втором интервалах противоположна первому случаю. Уравнение линии переключения для синтеза управляющего устройства может быть получено из уравнений фазовых траекторий для объекта (1). Для верхней полуплоскости фазовая траектория, проходящая через конечную точку, имеет вид

$$y = -T\ddot{y} + kU_0T \ln|kU_0 + \dot{y}| + y_k - kU_0T \ln|kU_0|, \quad (4)$$

а для нижней полуплоскости

$$y = -T\ddot{y} - kU_0T \ln|kU_0 - \dot{y}| + y_k + kU_0T \ln|kU_0|. \quad (5)$$

Анализ выражений (4) и (5) позволяет путем математических преобразований получить общее уравнение для всей линии переключения:

$$y = y_k - T\ddot{y} + kU_0T \left[\ln(kU_0 + |\dot{y}|) - \ln kU_0 \right] \text{sign } \dot{y}. \quad (6)$$

Из соотношения (6) находим функцию переключения:

$$M = y_k - y - T\ddot{y} + kU_0T \left[\ln(kU_0 + |\dot{y}|) - \ln kU_0 \right] \text{sign } \dot{y}. \quad (7)$$

Функция переключения M положительна, если изображающая точка находится левее линии переключения, и отрицательна, если изображающая точка находится правее линии переключения. Поэтому оптимальное по быстродействию управление для замкнутой системы должно формироваться в соответствии с выражением

$$u = U_0 \text{sign } M \quad (8)$$

Проведенное моделирование показало, что при автономных разворотах управление по разомкнутой и замкнутой схеме дает одни и те же результаты.

ФОРМИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ОДНОВРЕМЕННОГО РАЗВОРОТА ПЛАТФОРМЫ И ОЭП

В работе [1] показано, что при одновременном развороте возникают перекрестные связи, влияющие на динамику движения платформы и ОЭП. На рис. 4 изображена структурная схема подвижной системы как объекта управления с учетом перекрестных связей, полученная в работе [2].

Разворот платформы обеспечивает первый канал управления, разворот ОЭП – второй канал. Поворот ОЭП приводит к изменению суммарного момента инерции подвижной системы и соответственно эквивалентной постоянной времени $T_{д1}$ первого канала, что показано линейной связи между выходом второго канала и двигателем первого канала. Влияние углового движения платформы на второй канал показано связью выхода редуктора первого канала со сравнивающим устройством второго канала. Коэффициент $k_{\vartheta\psi}(\vartheta)$ учитывает степень влияния скорости углового движения платформы на величину центробежного момента и определяется выражением

$$k_{\vartheta\psi}(\vartheta) = \sin \vartheta \cos \vartheta. \quad (9)$$

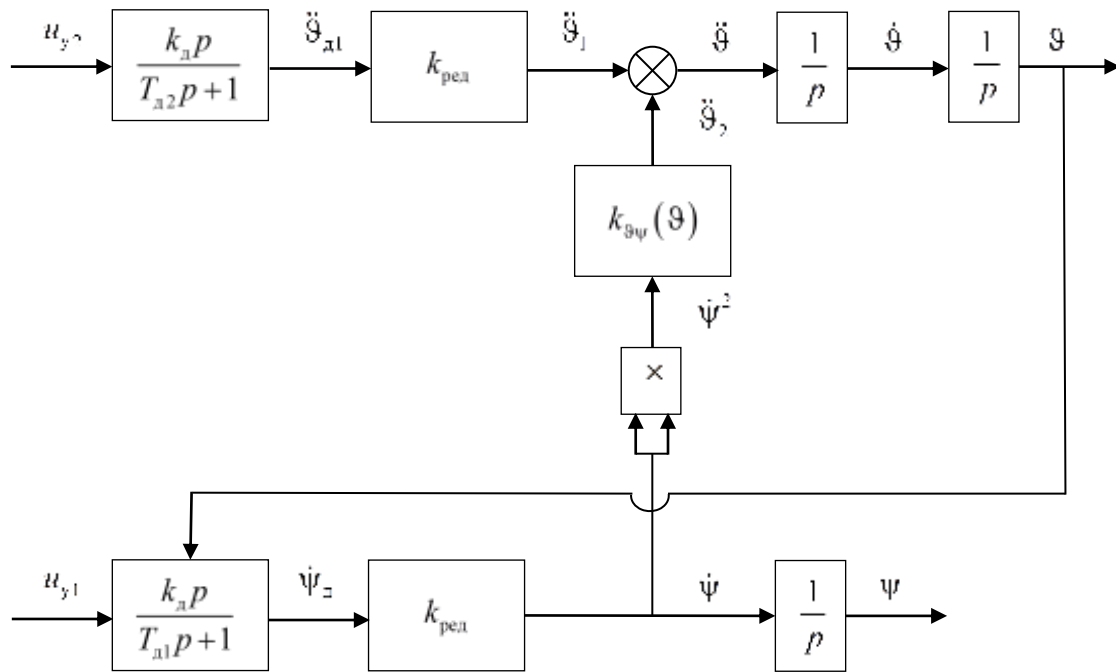


Рис. 4. Структурная схема:

ψ, ϑ – углы разворота платформы и ОЭП; k_d – коэффициент передачи двигателя; T_{d1}, T_{d2} – постоянные времени двигателей; $k_{ред}$ – коэффициент передачи редуктора

В соответствии с выражениями (7) и (8) управляющие напряжения для первого и второго каналов формируем в соответствии с выражением

$$u_{y_i} = U_0 \operatorname{sign} M_i, i = 1, 2, \quad (10)$$

где

$$M_1 = \psi_k - \psi - T_{d1} \dot{\psi} + k U_0 T_{d1} \left[\ln(k U_0 + |\dot{\psi}|) - \ln k U_0 \right] \operatorname{sign} \dot{\psi}, \quad (11)$$

$$M_2 = \vartheta_k - \vartheta - T_{d2} \dot{\vartheta} + k U_0 T_{d2} \left[\ln(k U_0 + |\dot{\vartheta}|) - \ln k U_0 \right] \operatorname{sign} \dot{\vartheta}, \quad (12)$$

$$k = k_d k_{ред}.$$

Для выбранных параметров системы расчет показал, что при развороте ОЭП из нулевого положения на угол 60° постоянная времени T_{d1} меняется от 0,27 с до 0,232 с. Это изменение постоянной времени приводит к изменению функции переключения (11), следовательно и переходного процесса. Моделирование показало, что при развороте платформы на угол 100° это влияние незначительно. Отклонение по углу на всей траектории разворота не превышало 1,5%, а в конечной точке разворота составило $0,2^\circ$, по угловой скорости не превышало 7%, а в конечной точке разворота составило $1,3^\circ/\text{с}$. Длительность переходного процесса была практически одна и та же.

Поворот платформы приводит к возникновению центробежного момента, который существенно влияет на процесс разворота ОЭП. При развороте ОЭП из нулевого положения на угол 60° максимальное отклонение по углу составило $4,7^\circ$, в конечной точке разворота равнялось $1,2^\circ$. По угловой скорости максимальное отклонение составило $30,3^\circ/\text{с}$, в конечной

точке разворота равнялось 12,5°/с. Длительность переходного процесса увеличилась по сравнению с автономным разворотом на 9%.

Этот частный случай показывает, что перекрестные связи оказывают сравнительно небольшое влияние на разворот платформы и более существенное на разворот ОЭП. Вместе с тем следует учитывать, что фактическая линия переключения для первого канала меняется в процессе разворота ОЭП, поэтому возможны два подхода при формировании расчетной функции переключения. При первом подходе расчетная функция переключения формируется в начале разворота по среднему углу поворота ОЭП, при втором подходе она рассчитывается в процессе разворота с достаточно малым шагом по текущему углу поворота ОЭП.

Для набора статистики было проведено моделирование для всех возможных вариантов при развороте платформы в диапазоне 0°–180°, для ОЭП в диапазоне 0°–90° с дискретностью 5°. В качестве критерия было выбрано суммарное время разворота для всех вариантов перебора, оно составило при первом подходе 8701 с для платформы и 3855 с для ОЭП, при втором подходе 8605 с для платформы и 3812 с для ОЭП. Следовательно, с точки зрения уменьшения длительности разворотов второй подход предпочтительнее, однако для его реализации потребуется большее количество вычислений.

Перебор показал, что для платформы примерно в половине случаев взаимовлияние приводило к ускорению процесса перевода, но не более чем на 1%, в остальных случаях процесс замедлялся (табл. 1).

Таблица 1

Анализ влияния перекрестных связей платформы

Замедление, %	% случаев
>25%	0,65
20-25	2
15-20	6
10-15	11
5-10	13
0-5	12
Всего	44

В подавляющем числе случаев замедление длительности переходного процесса происходило при уменьшении угла поворота ОЭП, вследствие чего возрастал момент инерции подвижной системы.

Для ОЭП в 20% случаев взаимовлияние приводило к ускорению процесса перевода, но не более чем на 8%, в остальных случаях процесс замедлялся (табл. 2). В подавляющем числе случаев уменьшение длительности переходного процесса происходило при уменьшении угла поворота ОЭП вследствие сложения управляющего момента двигателя и центробежного момента.

Как правило, замедление разворота ОЭП происходило при увеличении угла. На рис. 5 приведены фазовые траектории при увеличении угла поворота ОЭП, где сплошной линией показан процесс при оптимальном по быстрдействию автономном развороте, пунктирной линией показан процесс при одновременном развороте платформы и ОЭП.

Таблица 2

Анализ влияния перекрестных связей ОЭП

Замедление, %	% случаев
>15	4
10–15	9
5–10	14
0–5	54
Всего	81

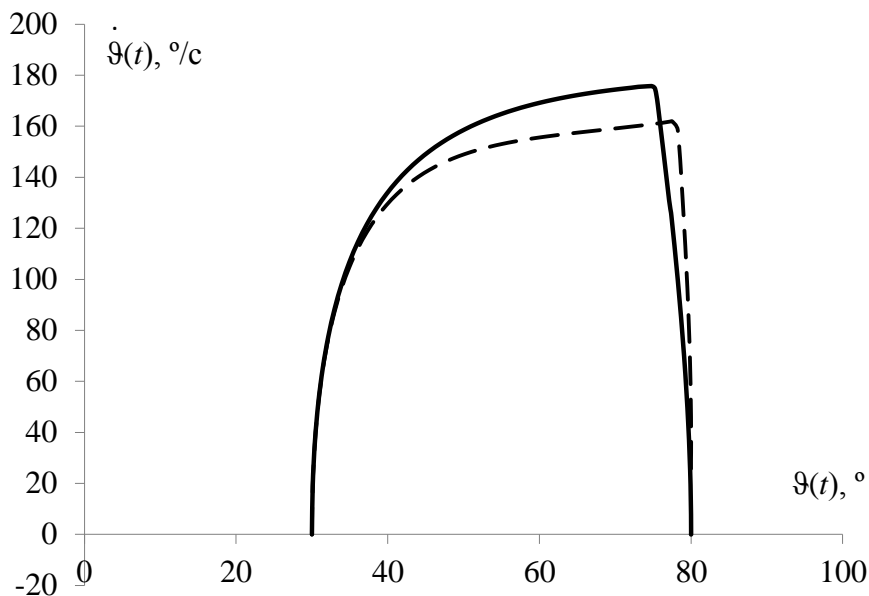


Рис. 5. Фазовые траектории разворота ОЭП при увеличении угла высоты

Как видно, центробежный момент препятствует развороту на этапе разгона, вследствие чего разворот осуществляется с меньшей угловой скоростью, что приводит к увеличению времени разгона. На этапе торможения угол становится большим, центробежный момент уменьшается и практически не оказывает влияния на процесс торможения.

На рис. 6 приведены фазовые траектории при уменьшении угла поворота ОЭП (сплошной линией показан процесс при оптимальном по быстродействию автономном развороте, пунктирной линией показан процесс при одновременном развороте платформы и ОЭП).

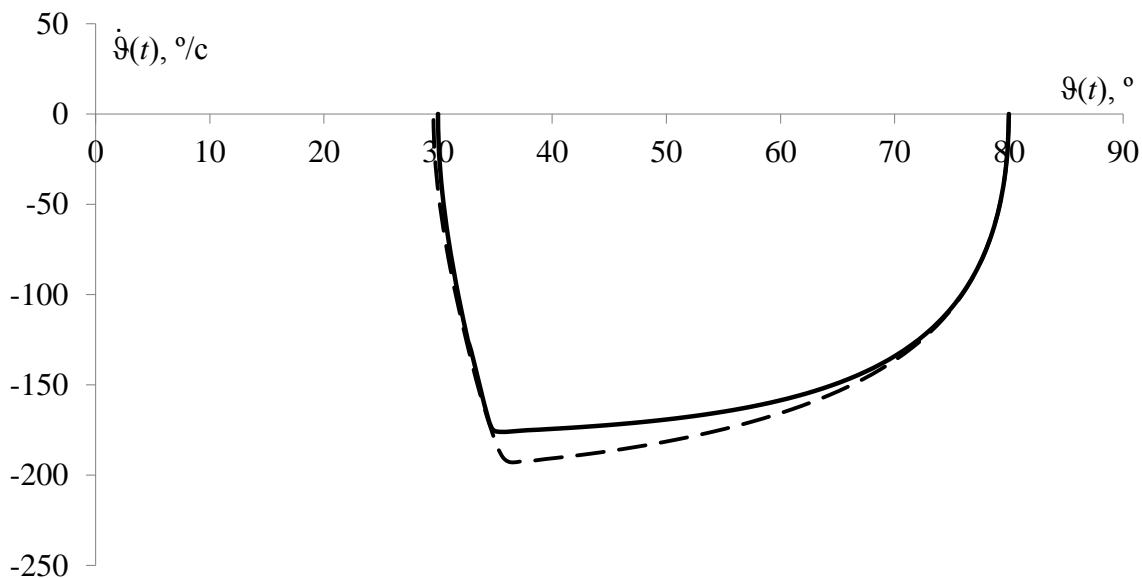


Рис. 6. Фазовые траектории разворота ОЭП при уменьшении угла высоты

Центробежный момент способствует процессу разгона, движение происходит с большей угловой скоростью, время разгона уменьшается, однако на этапе торможения центробежный момент препятствует управляющему моменту двигателя, что приводит к увеличению ошибки по углу и угловой скорости в конечной точке разворота.

ФОРМИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ НА ЗАВЕРШАЮЩЕМ ЭТАПЕ

В конце разворота вследствие взаимовлияния каналов переходный процесс для платформы и ОЭП завершается с отклонениями по углу и по угловой скорости. На рис. 7 показаны кривые завершения процесса разворота ОЭП по ошибке, а на рис. 8 – по угловой скорости и соответствующему управлению при одновременном повороте платформы на 70 град и уменьшении угла поворота ОЭП с 80 град до 30 град.

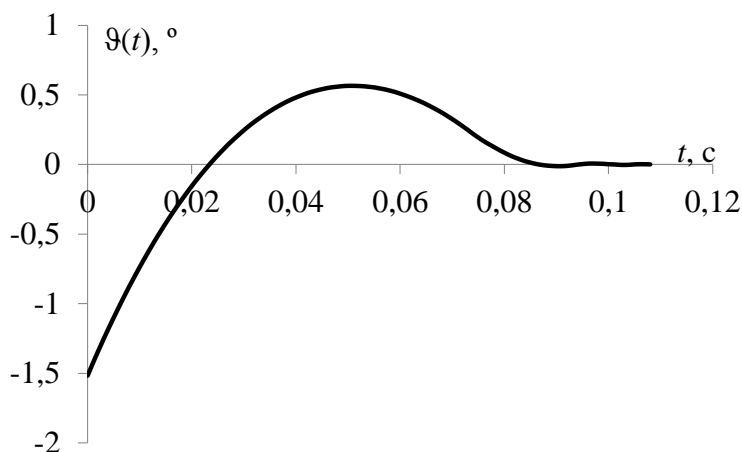


Рис. 7. Переходный процесс по ошибке

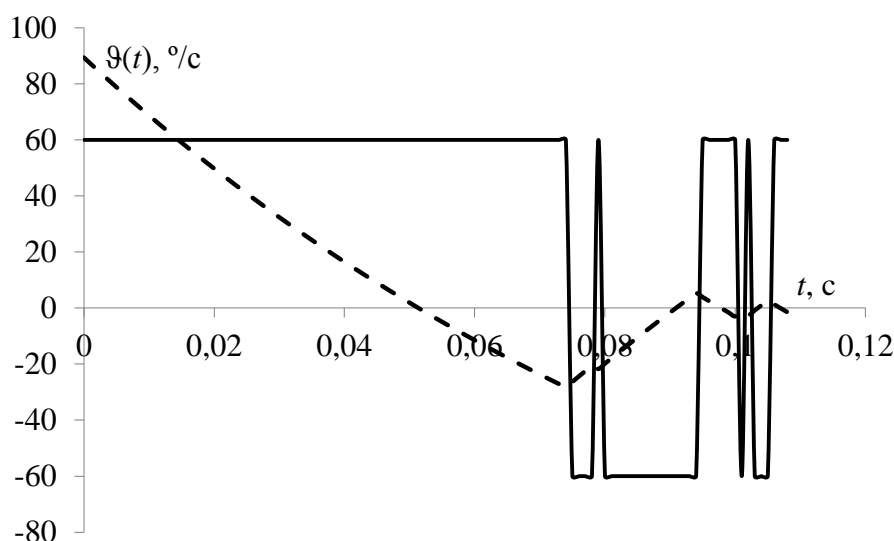


Рис. 8. Переходные процессы по угловой скорости и управляющему напряжению

Как видно, окончание процесса происходит с перерегулированием, а по достижении конечной точки возникает нежелательный режим переключения с высокой частотой управляющего момента двигателя с положительного на отрицательное максимальное значение.

Для устранения этого явления необходимо при достижении некоторой малой окрестности конечной точки переключать алгоритм управления с оптимального по быстродействию на линейный режим. В качестве такого алгоритма целесообразно использовать предложенный в работе [2] линейный алгоритм с компенсацией взаимовлияния каналов. На рис. 9 приведены процессы такого управления при одновременном повороте платформы на 70 град и уменьшении угла поворота ОЭП с 80 град до 30 град на завершающем этапе. На рис. 10 приведены процессы изменения угловой скорости и управляющего напряжения. На рис. 11 показано изменение компенсирующего взаимовлияния напряжения.

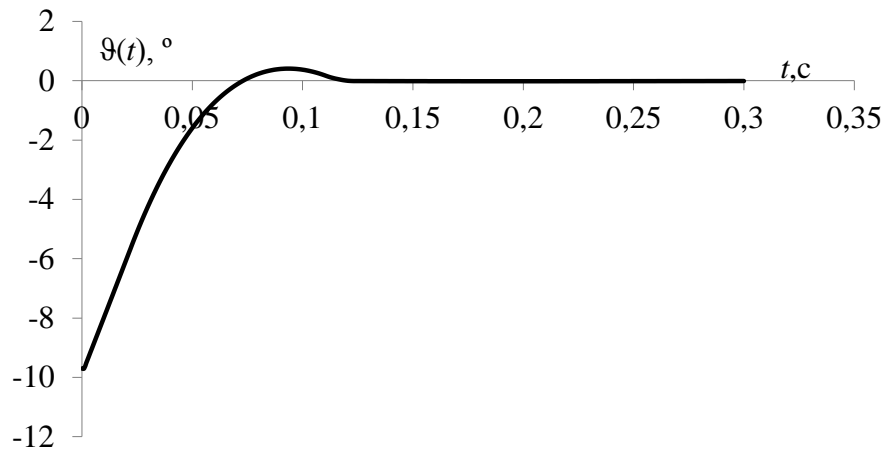


Рис. 9. Переходный процесс по ошибке на завершающем этапе

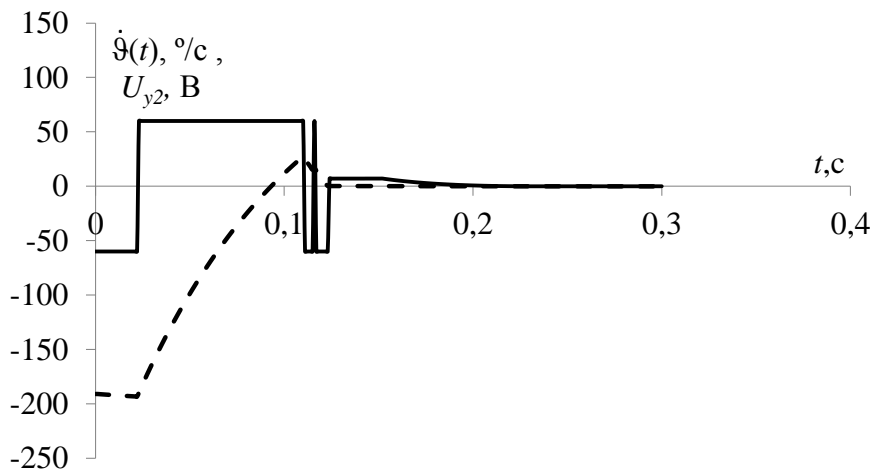


Рис. 10. Процессы по скорости и управляющему напряжению на завершающем этапе

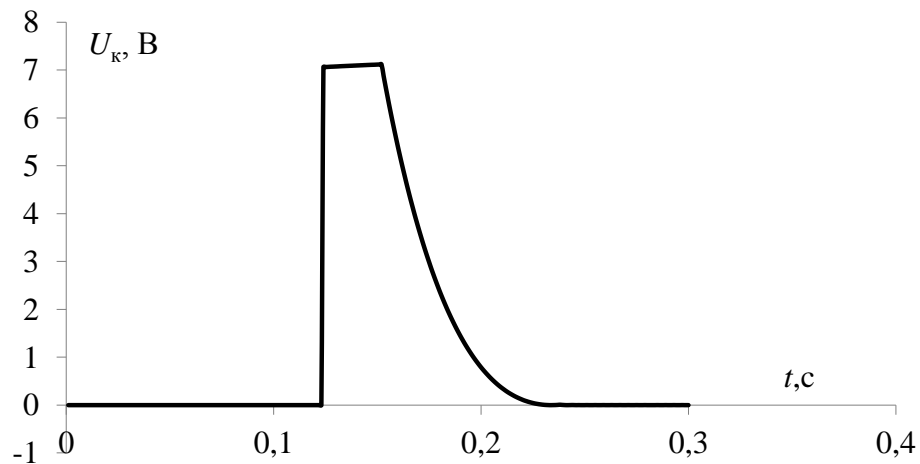


Рис. 11. Компенсирующее напряжение на завершающем этапе

Моделирование при различных начальных и конечных углах разворота показало, что компенсирующее взаимовлияние каналов напряжения целесообразно включать только на завершающем этапе при включении линейного алгоритма. Включение компенсирующего напряжения во время основного разворота приводит либо к замедлению процесса движения, либо к возникновению напряжения на входе двигателя, превышающего номинальное значение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Алгоритм оптимального по быстродействию управления обеспечивает существенное снижение длительности процесса наведения ОЭП на цель по сравнению с традиционным линейным алгоритмом. Управление процессом наведения по разомкнутой схеме, вследствие взаимовлияния при одновременном развороте платформы и ОЭП, приводит к большим отклонениям по углу и угловой скорости в конечной точке, поэтому более предпочтительным является управление по замкнутой схеме. Перекрестные связи в зависимости от комбинации углов и направления движения при одновременных разворотах приводят как к увеличению, так и уменьшению времени разворота по сравнению со временем при автономном движении. Как правило, время разворота всей подвижной системы уменьшается при увеличении угла поворота ОЭП, а время разворота ОЭП – при уменьшении этого угла. Влияние перекрестных связей приводит к появлению отклонения от требуемых значений по углу и угловой скорости в конце оптимального разворота, поэтому при достижении заданной малой окрестности конечной точки необходимо организовать переключение с оптимального по быстродействию управления на линейный алгоритм.

Список используемых источников

1. *Крыжановский В.И., Щербаков В.И.* Математическая модель двухконтурной следящей системы для наведения на цель оптико-электронного прибора // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 667. – С. 337–345.
2. *Крыжановский В.И., Трофимов И.А.* Учет перекрестных связей в двухконтурной следящей системе для наведения на цель оптико-электронного прибора // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2020. – Вып. 672. – С. 307–315.
3. *Бесекерский В.А., Попов Е.П.* Теория систем автоматического управления. – 4-е изд. – СПб.: Профессия, 2003. – 752 с.

М.Н. Лупашко;
И.В. Степанов;
В.В. Тимофеев,
кандидат технических наук, доцент

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРИОДИЧНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗАПАСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Рассмотрена стратегия использования элементов вычислительных систем (процессоров, вычислительных модулей), при которой элементы функционируют поочередно в течение некоторого заданного интервала времени. Получена целевая функция, позволяющая оценить с позиции надежности оптимальное значение для этого интервала. Показано, что с уменьшением длительности интервала, вероятность безотказной работы вычислительной системы растет, однако ее прирост имеет выраженный максимум и с ростом числа интервалов уменьшается.

Ключевые слова: вычислительная система, надежность, резервирование замещением, ненагруженный резерв, вероятность безотказной работы.

ВВЕДЕНИЕ

Вычислительные системы (ВС) являются основным информационным звеном автоматизированных систем специального назначения, поэтому надежности их функционирования уделяется большое внимание. Повысить надежность функционирования ВС можно не только восстановлением ее работоспособности после отказа составных частей, но и увеличением наработки между отказами.

Одним из способов увеличения наработки между отказами является эффективное использование элементов ВС (процессоров, вычислительных модулей) или их запасных частей из состава ЗИП [1], которыми комплектуется ВС при вводе в эксплуатацию. Обычно при функционировании ВС в режиме высокой надежности ее вычислительные модули (ВМ) делят на основные и резервные. Резервные ВМ используют по мере отказов основных. Альтернативной является стратегия, когда основные и резервные модули ВС используются в процессе эксплуатации поочередно [2].

Данная стратегия позволяет равномерно расходовать ресурс надежности как основных, так и резервных ВМ ВС, и тем самым увеличить наработку между их отказами. Однако для практического применения этой стратегии необходимо выбрать длительность интервала периодичности использования резервных и основных ВМ ВС.

Для определения длительности интервала периодичности необходима математическая модель, описывающая поведение ВС во времени с позиции надежности. Целевая функция модели должна обеспечивать обоснование длительности интервала периодичности.

ПРИНЦИП ПЕРИОДИЧНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ В ПРОЦЕССЕ ЕЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

Вычислительная система, состоящая из нескольких ВМ, с позиции надежности эквивалентна резервированной системе. Если резервный ВМ ВС в конкретный период ее работы находится в выключенном состоянии и не теряет надежности, то ВС можно рассматривать как резервированную систему с ненагруженным резервом [3–5].

Если предположить, что отказы одних ВМ ВС не влияют на отказы других ее ВМ, то поведение системы с позиции надежности для определения интервала периодичности достаточно рассмотреть на примере одного основного ВМ и соответствующего ему резервного ВМ. При допущении, что оба ВМ идентичны, так как изготавливаются по одной и той же технологии, их пару можно представить системой с ненагруженным резервированием замещением (рис. 1).

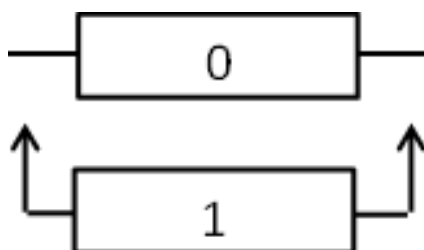


Рис. 1. Общее резервирование замещением:
0 – основной элемент; 1 – резервный элемент

При этом и основной и резервный ВМ работают поочередно в течение некоторого заданного промежутка времени.

Временная диаграмма работы такой системы показана на рис. 2.

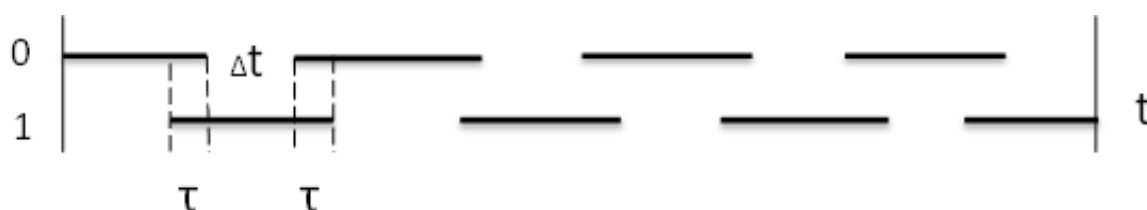


Рис. 2. Поочередная работа элементов:
 Δt – время работы по функциональному назначению; τ – время переключения

Время переключения обычно существенно меньше времени Δt работы ВМ по функциональному назначению, однако при значительном увеличении частоты переключений τ приближается к Δt и должно учитываться при расчетах.

ЗАВИСИМОСТЬ НАДЕЖНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОТ ПЕРИОДИЧНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЕЕ ЭЛЕМЕНТОВ

Определим вероятность $P_c(t)$ безотказной работы резервированной системы при следующих допущениях:

- основной и резервный элементы равно надежны и имеют вероятность безотказной работы $P(t)$;
- во время нахождения элемента в резерве его надежностный ресурс не расходуется;
- переключение основного элемента на резервный и обратно осуществляется с вероятностью, равной единице;
- $\Delta t \gg \tau$ и потому принимаем $\tau = 0$.

Резервированная система проработает безотказно в течение времени t при наступлении одного из трех несовместных событий:

– событие A_1 заключается в том, что основной и резервный элементы проработают безотказно в течение времени t , при этом наработка каждого из них составит $t/2$;

– событие A_2 заключается в том, что основной элемент откажет в одном из интервалов Δt , а резервный элемент проработает исправно оставшееся время, при условии, что до этого он исправно проработал в предыдущих интервалах;

– событие A_3 заключается в том, что резервный элемент откажет в одном из интервалов Δt , а основной элемент проработает исправно оставшееся время, при условии, что до этого он исправно проработал в предыдущих интервалах.

Иллюстрация событий показана на рис.3.

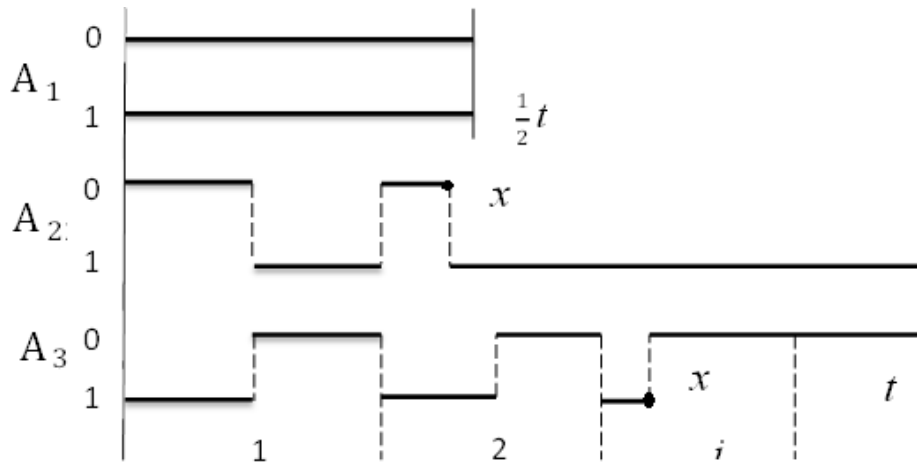


Рис. 3. Возможная наработка элементов

Вероятность события A_1 в соответствии с принятыми допущениями будет определяться выражением

$$P(A_1) = P\left(\frac{t}{2}\right)^2. \quad (1)$$

Вероятность события A_2 равна вероятности события A_3 и определяется следующим выражением:

$$P(A_2) = P(A_3) = \sum_{i=0}^{\frac{t}{2\Delta t}} \int_0^{\Delta t} f(x + (i-1)\Delta t) P(t - (i-1)\Delta t - x | (i-1)\Delta t + x) dx, \quad (2)$$

где $f(x + (i-1)\Delta t)$ – плотность распределения вероятностей времени безотказной работы основного элемента в момент времени $x + (i-1)\Delta t$;

$P(t - (i-1)\Delta t - x | (i-1)\Delta t + x)$ – условная вероятность безотказной работы резервного элемента за время $t - (i-1)\Delta t - x$ при условии, что за время $(i-1)\Delta t + x$ он не отказал,

$$P(t - (i-1)\Delta t - x | (i-1)\Delta t + x) = \frac{P(t)}{P((i-1)\Delta t + x)}$$

Так как события A_1 , A_2 и A_3 независимы друг от друга, то вероятность безотказной работы резервированной системы $P_c(t)$ будет равна сумме вероятностей событий:

$$P_c(t) = P\left(\frac{t}{2}\right)^2 + 2P(t) \sum_{i=0}^{\frac{t}{2\Delta t}} \int_0^{\Delta t} \frac{f(x + (i-1)\Delta t)}{P((i-1)\Delta t + x)} dx. \quad (3)$$

Для общего случая, когда общее число основного и соответствующих ему резервных элементов составляет n , выражение для $P_c(t)$ примет следующий вид:

$$P_c(t) = P\left(\frac{t}{n}\right)^n + \sum_{j=1}^{n-1} C_n^j \sum_{i_1=1}^{l_1} \int_0^{\Delta t} f(x_1 + (i_1-1)\Delta t) \sum_{i_2=1}^{l_2} \int_0^{\Delta t} f(x_2 + (i_2-1)\Delta t) \dots \sum_{i_j=1}^{l_j} \int_0^{\Delta t} f(x_j + (i_j-1)\Delta t) \left[\frac{P\left(\frac{t + (n-j-1) \sum_{k=1}^j [(i_k-1)\Delta t + x_k]}{n-j}\right)}{P\left(\sum_{k=1}^j [(i_k-1)\Delta t + x_k]\right)} \right]^{n-j} dx_j \dots dx_2 dx_1, \quad (4)$$

$$\text{где } I_l = \frac{t - \sum_{k=1}^{l-1} [(i_k-1)\Delta t + x_k]}{(n-l-1)\Delta t}.$$

ПРИМЕР ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ ПЕРИОДИЧНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗАПАСНЫХ ЧАСТЕЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Определим оптимальную периодичность использования в процессе функционирования одного основного и соответствующего ему резервного ВМ ВС, используя полученное выражение (3).

Пусть время безотказной работы основного и резервного ВМ, как случайная величина, имеет распределение вероятностей, соответствующее закону Вейбулла-Гнеденко. Тогда

$$P_c(t) = e^{-\frac{t^k}{T}}, \text{ а } f(t) = \frac{k}{T} t^{k-1} e^{-\frac{t^k}{T}}, \text{ где } k \text{ и } T - \text{ параметры закона Вейбулла-Гнеденко, а значение}$$

аргумента t лежит в диапазоне $[0, \infty)$. Выбор часто применяемого закона Вейбулла-Гнеденко обусловлен тем, что он одинаково хорошо описывает надежностные характеристики технических объектов на всех этапах их эксплуатации (приработку, нормальную эксплуатацию, старение).

Расчет по формуле (3) с выбранными параметрами закона Вейбулла-Гнеденко ($k = 2$ и $T = 10\,000$ ч) выглядит следующим образом:

$$P_c(t) = e^{-\frac{2t^2}{10000}} + 2e^{-\frac{t^2}{10000}} \sum_{i=1}^{\frac{t}{2\Delta t}} \int_0^{\Delta t} \frac{1}{5000} (x + (i-1)\Delta t) e^{-\frac{(x+(i-1)\Delta t)^2}{10000}} \frac{dx}{e^{-\frac{((i-1)\Delta t + x)^2}{10000}}}. \quad (5)$$

Поскольку в выражении (5) получить конечное аналитическое выражение для определенного интеграла невозможно, то значение $P_c(t)$ вычисляется приблизительно.

На рис. 4 приведены зависимости вероятности $P_c(t)$ и ее прироста $\Delta P_c(t)$ от количества интервалов.

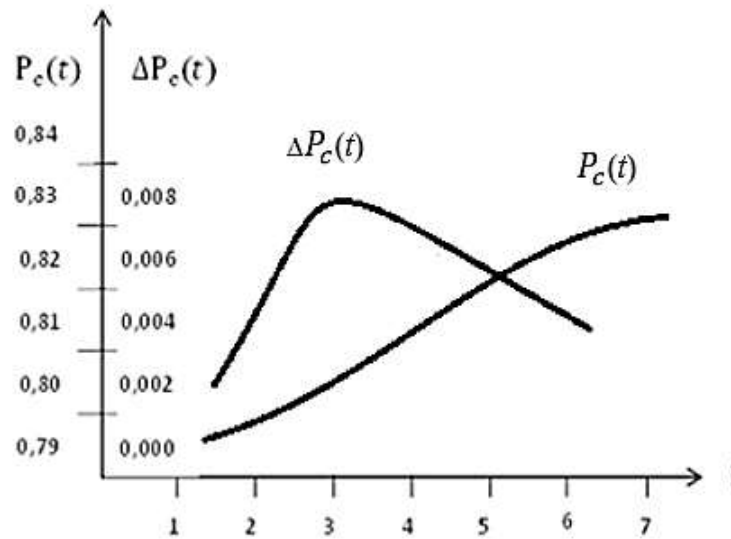


Рис. 4. Зависимости вероятности $P_c(t)$ безотказной работы резервированной системы и ее прироста $\Delta P_c(t)$ от числа i интервалов

Из графиков видно, что с ростом числа интервалов или, что одно и то же, с уменьшением длительности интервала, вероятность безотказной работы резервированной системы $P_c(t)$ растет. Однако ее прирост имеет выраженный максимум и с ростом числа интервалов уменьшается, т. е. нет смысла сокращать длительность интервалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях реальной эксплуатации ВС неизбежно возникают отказы ее элементов, что существенно снижает производительность ВС. Поэтому для поддержания ВС в работоспособном состоянии необходимо минимизировать число отказов ее ВМ. В статье показано, что одним из способов увеличения наработки на отказ ВС в процессе ее функционирования, является периодическое использование запасных и резервных ВМ. Получаемый при этом эффект зависит от длительности интервала периодичности работы резервных и основных ВМ.

Теоретическая ценность полученных результатов обусловлена тем, что впервые с позиции надежности описана во времени периодическая работа пары «основной – резервный элемент». Полученная при этом целевая функция в виде вероятности безотказной работы этой пары, как резервированной системы, позволяет определить оптимальный интервал периодичности работы основного и резервного элемента. В этом заключается прикладной аспект полученных результатов. Таким образом, для конкретной ВС можно выделить ее основные и резервные ВМ, по известным методикам рассчитать их надежность характеристики и по предложенной математической модели определить оптимальную длительность их периодической работы.

Список используемых источников

1. ГОСТ 2.601–2013. Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Эксплуатационные документы. – М.: Стандартинформ, 2014. – 49 с.

2. Тимофеев В.В., Цыбрин В.Г. Стратегии использования запасных частей вычислительных комплексов автоматизированных систем военного назначения // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. – 2019. – № 666. – С. 167–172.
3. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: БХВ–Петербург, 2006. – 704 с.
4. Черкесов Г.Н. Надежность аппаратно–программных комплексов: учеб. пособие. – СПб.: Питер, 2005. – 479 с.
5. Ермаков А.А. Основы надежности информационных систем: учеб. пособие. – Иркутск: ИрГУПС, 2006. – 151 с.

В.В. Онуфриев*,
доктор технических наук, доцент;
А.А. Паршиков**;
С.Ю. Сазонов*

*МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва.

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

РАСЧЕТ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМОЭМИССИОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С УЧЕТОМ ПАРЦИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИМЕСИ В МЕЖЭЛЕКТРОДНОМ ЗАЗОРЕ

В процессе работы термоэмиссионного преобразователя (ТЭП) в межэлектродном зазоре (МЭЗ) образуется значительное количество газообразных примесей вследствие деления топлива, затрудняющее перенос тока. В настоящей статье предлагается полуэмпирический метод расчета вольт-амперной характеристики (ВАХ) дугового разряда с ксеноном. Разработана модифицированная методика расчета ВАХ, заполненного смесью пара цезия и инертного газа в МЭЗ ТЭП. Рассчитаны ВАХ в зависимости от парциального давления ксенона. Показано влияние парциального давления ксенона на выходное напряжение ТЭП.

Ключевые слова: термоэмиссионный преобразователь энергии, вольтамперная характеристика, парциальное давление, сечение рассеяния, дуговые потери напряжения.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время на околоземной орбите находятся тысячи искусственных спутников, выведенных ракетами-носителями с мощными реактивными двигателями на химическом топливе. Пока человечество не смогло придумать альтернативу таким двигателям, поскольку для преодоления гравитации Земли и развития первой космической скорости необходима мощная тяга: ее могут дать только обычные двигатели.

При этом уже в космосе спутники используют другой тип двигателей – электрические. Самым используемым является ионный двигатель – устройство, принцип работы которого основан на создании реактивной тяги на базе ионизированного газа, разогнанного до высоких скоростей в электрическом поле.

Ионные двигатели в ближайшем будущем позволят заменить двигатели орбитального движения малых космических аппаратов, что увеличит срок их активной работы (эксплуатации) в 2–3 раза и продлит срок их жизни с 2–3 лет до 5–10 лет.

В основе работы термоэмиссионного реактора-преобразователя ионного двигателя используется термоэмиссионный преобразователь (ТЭП), который непосредственно из тепловой энергии вырабатывает электрическую. С электротехнической точки зрения ТЭП является, в зависимости от среды в межэлектродном зазоре (МЭЗ), вакуумным или плазменным диодом. Для работы ТЭП необходим подвод тепловой энергии к эмиттерному электроду и отвод от коллекторного электрода таким образом, чтобы обеспечивалась разность их энергий при эмиссии с одного электрода и конденсации электронов на другом. Как правило, данные условия выполняются за счет разницы работ выхода с поверхностей электродов при переменной степени покрытия их цезием.

При проектировании ТЭП актуальным является создание методики инженерного расчета, позволяющей рассчитать параметры вольт-амперной характеристики (ВАХ) с учетом особенностей рабочего процесса. В процессе работы в МЭЗ ТЭП (функционирующего в составе термоэмиссионного реактора-преобразователя) происходит накопление газообразных примесей вследствие реакции деления топлива и вывода их из объема эмиттерной полости через

газоотводное устройство, которые снижают скорость генерации ионов и увеличивают потери энергии электронов. Поэтому существующие инженерные методики [1, 2] расчета ВАХ необходимо модифицировать с учетом влияния парциальных давлений примесей в МЭЗ ТЭП на выходные электрические характеристики: напряжение и ток.

Данная статья посвящена разработке модифицированной методики инженерного расчета ВАХ дугового разряда ТЭП, заполненных смесью пара цезия и инертных газов.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМОЭМИССИОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

В качестве базовой методики используется полуэмпирическая методика расчета ВАХ, наполненного только цезием ТЭП, известная как «**SET**» [1]. Данная методика получена методом аппроксимации ее алгебраическими зависимостями модели «**TOR**» [2].

В модели методики [1] генерируемое ТЭП напряжение представлено в виде:

$$eV = \Phi_B - \Phi_C^{\text{эф}} - eV_{\text{дуг}}, \quad (1)$$

где $\Phi_B, \Phi_C^{\text{эф}}$ – работы выхода Больцмановская и коллектора соответственно, эВ;
 $V_{\text{дуг}}$ – дуговые потери напряжения, определяемые аппроксимированной зависимостью [1] следующим образом:

$$V_{\text{дуг}} = 0,4 + V_1 + V_2 + V_3 - V_4 + V_5, \quad (2)$$

где V_1 – составляющая потери напряжения из-за неоптимальной величины произведения давления пара цезия в МЭЗ P_{Cs} на величину его межэлектродного зазора d – ($P_{Cs} \cdot d$);
 V_2 – потеря на участке насыщения эмиссионного тока;
 V_3 – потеря напряжения на участке шнурования дугового разряда;
 V_4 – поправка по напряжению при переходе дугового разряда в диффузионный режим;
 V_5 – потеря напряжения из-за эмиссии электронов с коллектора.

Значения величин, используемых в формуле (2) по методике [1] рассчитываются на основании следующих выражений:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_1 = \alpha \cdot P_{Cs} \cdot d \cdot \left(1 + \frac{j}{80}\right) + \left(\frac{0,036}{P_{Cs} \cdot d}\right)^2 \\ V_2 = Z + \sqrt{Z^2 + 0,0025} \\ V_3 = \frac{k}{e} T_E \ln \left(1 + \frac{j_2}{j}\right) \\ V_4 = \frac{\frac{k}{e} T_E \ln \left(1 + \frac{j_2}{j + j_3}\right) + (2 + 8P_{Cs} \cdot d)^{-1}}{1 + (j/j_3)^4} \\ V_5 = \frac{k}{e} T_C \ln \left[1 + \frac{j_C}{j + j_2} \left(1 + \frac{T_E - T_C}{T_C} \cdot \frac{1}{P_{Cs} \cdot d}\right)\right] \end{array} \right. \quad (3)$$

где j – плотность тока, А/см²;
 P_{Cs} – давление пара цезия, Торр;
 d – длина МЭЗ, мм;
 j_E – плотность тока с эмиттера, А/см², $j_E = f_4(\Phi_{E0}, P_{Cs}, T_E)$;

j_2, j_3, Z – параметры, зависящие T_E, P_{CS}, d [1];
 α – эмпирический коэффициент, $\alpha \approx 0,03 \dots 0,3$.

Методика расчета ВАХ [3] определяет генерируемое ТЭП напряжение по следующей зависимости:

$$eV = \Phi_E^{\text{эф}} - \Phi_C^{\text{эф}} - 2k \left[\frac{j_{\text{Э}}}{j} \Delta T_{eE} + \frac{j_K}{j} \Delta T_{eK} - T_{eE} + T_{eK} \right] + \frac{eU_i \cdot j_{iE}}{j}, \quad (4)$$

где $\Phi_E^{\text{эф}}, \Phi_C^{\text{эф}}$ – эффективные работы выхода эмиттера и коллектора соответственно [4];
 T_{eE}, T_{eK} – температуры электронов у эмиттера и коллектора соответственно;
 $\Delta T_{eE}, \Delta T_{eK}$ – разности температур электронов у соответствующего электрода и температуры электрода;
 j_{iE} – плотность ионного тока с эмиттера, являющаяся функцией температуры электронов и приэлектродного скачка потенциала [3];
 $j_{E,K}$ – плотности тока эмиссии с эмиттера и коллектора.

Методика расчета ВАХ ТЭП [5] учитывает процессы ступенчатой ионизации атомов цезия и определяет генерируемое ТЭП напряжение:

$$eV = \Phi_E^{\text{эф}} - \Phi_K^{\text{эф}} + 2kT_E + kT_C \ln \frac{j_C}{j} - \frac{2eU_i}{\ln(j/j_r) - \ln[(1 + \gamma j)(1 + sj)]}, \quad (5)$$

где U_i – потенциал ионизации;
 j_r, γ, s – коэффициенты, зависящие от давления, температуры электронов, энергии и времени жизни возбужденных состояний, потенциала ионизации, дифференциальных коэффициентов возбуждения, частоты соударения электронов с атомами [5].

В работе [6] произведена оценка максимально возможных выходных электрических параметров ТЭП. Получено выражение для предельной ВАХ, огибающей все возможные для плазменного режима работы ТЭП. Эта кривая ВАХ описывается следующим выражением:

$$j = j_T V \left\{ \alpha^{T_{\text{Э}}/(T_{\text{Э}}-T_{\text{К}})} \frac{T_{\text{Э}}}{T_{\text{Э}}-T_{\text{К}}} \left[\frac{T_{\text{Э}}}{2T_{\text{eK}}-T_{\text{К}}} \right]^{T_{\text{К}}/(T_{\text{Э}}-T_{\text{К}})} \exp \left[\frac{kT_{\text{К}} - eV_{d0}}{k(T_{\text{Э}} - T_{\text{К}})} \right] \right\}, \quad (6)$$

где i_T – плотность тока идеального ТЭП при оптимальной работе выхода электронов из эмиттера;
 α – отношение плотности тока в точке излома ВАХ к плотности тока термоэлектронной эмиссии, $\alpha \approx 0,5$;
 $T_{\text{Э}}, T_{\text{К}}$ – температуры эмиттера и коллектора;
 T_{eK} – температура электронов у коллектора;
 V_{d0} – потери напряжения в МЭЗ, связанные с плазменными процессами вблизи точки излома ВАХ, $V_{d0} = 0,4 - 0,5$ В.

Методика расчета ВАХ ТЭП [7] описывает обобщенную вольт-амперную характеристику следующей зависимостью [8]:

$$\left(U - \frac{c}{j} \right) \left(U - \ln \frac{J}{1-J} - \frac{J}{v_0} \right) = \varepsilon \quad (7)$$

где U – безразмерное напряжение, $U = e \cdot V / (kT_e)$;
 J – безразмерная плотность тока, $J = j/j_R$, здесь j_R – плотность тока Ричардсона из эмиттера;
 v_0 – безразмерная проводимость плазмы [9];
 ε – характеризует ионизационные потери [9];
 c – характеризует потери энергии на прогрев электронов и прочие не связанные с ионизацией потери.

Левая скобка выражения (7) аппроксимирует ветвь с отрицательным сопротивлением, правая – кулоновскую ветвь [9]. Данное выражение описывает ВАХ при $J < 1$, но не учитывает влияние эффекта Шоттки, которое существенное, лишь при больших плотностях тока и приводит к отсутствию участка тока насыщения на ВАХ.

Для его учета в выражении (7) необходима поправка [9]:

$$\left(U - \frac{c \cdot s}{I}\right) \left(U - \ln \frac{I}{s-I} - \frac{I}{v_0}\right) = \varepsilon. \quad (8)$$

Здесь

$$s = \exp\left(\frac{1}{kT} \sqrt{\frac{e \cdot E}{4\pi\epsilon_0}}\right),$$

где s – множитель, учитывающий увеличение тока эмиссии;

E – напряженность электрического поля.

ВЛИЯНИЕ НА ВОЛЬ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИМЕСИ ИНЕРТНОГО ГАЗА В МЕЖЭЛЕКТРОДНОМ ЗАЗОРЕ

Для того, чтобы связать потери напряжения на дуговом разряде в ТЭП, вызванные наличием примеси (инертного газа), связанные с дополнительным рассеянием электронов в разряде на столкновениях с атомами ксенона, использовалось выражение (8). В качестве примеси рассмотрен ксенон.

Принятые допущения при моделировании ВАХ ТЭП с примесью в МЭЗ – примесь инертного газа не влияет на температуры электронов и ионов, приэлектродные падения напряжения, а влияет только на коэффициенты диффузии электронов и ионов.

Генерируемое ТЭП напряжение может быть представлено как

$$U - \delta U \quad (9)$$

где U – напряжение, генерируемое при аналогичных параметрах, если МЭЗ заполнен только паром цезия;

δU – дополнительные потери напряжения на дуге, вызванные введением в МЭЗ примеси (ксенона).

Для определения потерь напряжения было использовано выражение (8)

$$\left(U - \delta U - \frac{(c + \delta c)s}{I}\right) \left(U - \delta U - \ln \frac{I}{s-I} - \frac{I}{v_0}\right) = \varepsilon + \delta \varepsilon, \quad (10)$$

где δc и $\delta \varepsilon$ – возмущения параметров c и ε [9], вызванные парциальным давлением ксенона в МЭЗ:

$$\delta c = \frac{dc}{dp_{Xe}} \cdot p_{Xe}, \quad \delta \varepsilon = \frac{d\varepsilon}{dp_{Xe}} \cdot p_{Xe}.$$

Падение напряжения δU выражается из следующего уравнения, полученного из (10):

$$\delta U^2 + \delta U \left(\ln \frac{I}{s-I} + \frac{(c + \delta c)s}{I} + \frac{I}{v_0} - 2U \right) + \frac{\delta c}{I} \left(\ln \frac{I}{s-I} - U + \frac{I}{v_0} \right) - \delta \varepsilon = 0 \quad (11)$$

Предполагается, что электрон в МЭЗ в среднем соударяется с атомами примеси d/l_e раз, где d – длина МЭЗ, l_e – длина свободного пробега электрона. Тогда в МЭЗ электроны теряют $\delta S = j(2m/M)W_e(d/l_{ep})$, где W_e – средняя энергия электрона в МЭЗ.

Параметры ε и c могут быть выражены как:

$$\left\{ \begin{aligned} \delta\varepsilon &= \frac{4U_i p_{Xe} p_{Cs}}{kT_e} \sqrt{\frac{m}{M}} \left(1 + \frac{T_e}{T}\right) \left(\frac{T}{T_e}\right)^{3/2} \ln\left(\frac{4}{\pi\delta_i}\right) \frac{\sigma_{Xe}\sigma_{ia} - \sigma_{Xe-Cs}\sigma_{Cs}}{(p_{Cs}\sigma_{ia} + p_{Xe}\sigma_{Xe-Cs})^2}, \\ \delta c &= \frac{\delta S}{j_R k T_e} = \frac{2mW_e d\sigma_{Xe} p_{Xe}}{MT_e T k^2} \end{aligned} \right. \quad (12)$$

где σ_{Xe}, σ_{Cs} – сечения рассеяния электронов на атомах ксенона и цезия соответственно;

σ_{ia} – сечение резонансной перезарядки ионов на атомах цезия;

σ_{Xe-Cs} – сечение рассеяния атомов цезия на ксеноне;

p_{Xe} – давление ксенона;

T_e – температура электронов;

T – температура ионов и атомов;

v_e – средняя тепловая скорость электронов.

Для инженерной методики проектирования ВАХ была использована методика [1]. В выражение (2) было добавлено слагаемое $\delta U = \delta U(j, U)$ с учетом выражений (11) и (12). Используются напряжения и плотности тока, вычисленные по методике [1]. В результате для уточнения влияния парциального давления примеси (инертного газа) $\delta U = \delta U(j, U)$ на потери напряжения дугового разряда в МЭЗ ТЭП получено следующее выражение:

$$V_{\text{дуг}} = 0,4 + V_1 + V_2 + V_3 - V_4 + V_5 + \frac{kT_e}{e} \delta U \quad (13)$$

На рис. 1 представлен рассчитанный по формуле (13) набор ВАХ с учетом влияния парциального давления примеси – инертного газа. Представленные ВАХ рассчитаны для ТЭП с температурой эмиттера 1800 К, температурой коллектора 950 К, материалом электродов – вольфрам, длиной МЭЗ 0,4 мм, давлением пара цезия 4 Торр.

Одна из представленных ВАХ рассчитана для ТЭП по методике [1] (сплошная кривая на рис. 1), заполненного только паром цезия, две другие рассчитаны по предлагаемой уточненной методике (система уравнений (2) с учетом уравнений (8)–(13)) для смеси пара цезия и ксенона, парциальные давления ксенона равны 5 и 50 Торр (соответственно, кривая точками и кривая пунктирными линиями).

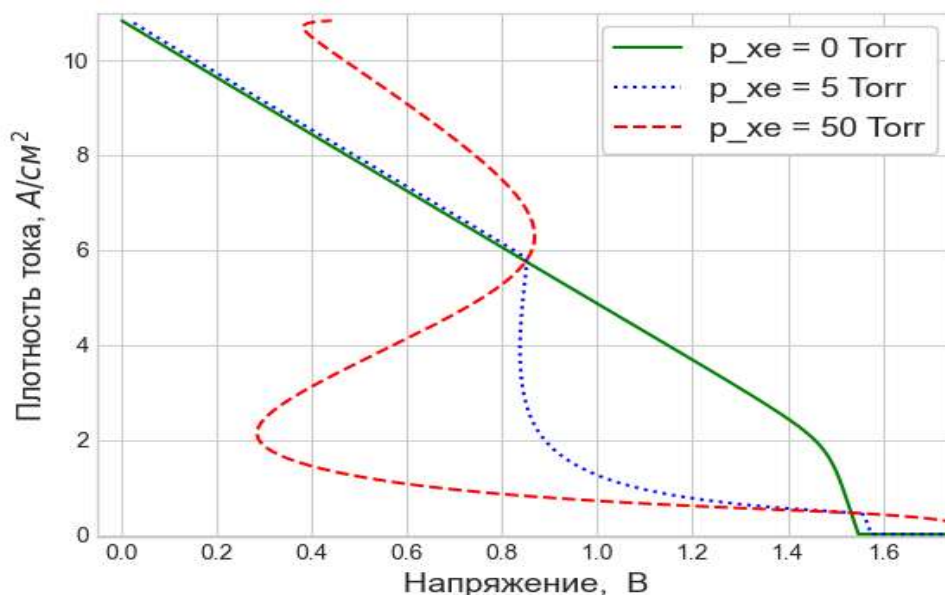


Рис 1. Набор ВАХ наполненного смесью цезия и ксенона ТЭП

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из полученной зависимости (13) следует, что из-за добавления примеси инертного газа при плотностях тока меньших плотности тока насыщения выходное напряжение ТЭП падает тем больше, чем больше парциальное давление инертного газа. Это связано с дополнительным рассеянием электронов на атомах ксенона. Как следствие, растут дуговые потери, что снижает выходное напряжение ТЭП и его электрическую мощность. Данный результат хорошо коррелирует с экспериментальными результатами исследования ТЭП [4, 8, 9].

Расчеты ВАХ ТЭП по модифицированной методике показывают, что при плотностях тока в МЭЗ генерируемое им напряжение немного увеличивается. Это может быть объяснено тем, что заметно возрастает роль кулоновских столкновений, и они начинают давать больший вклад, чем рассеяние электронов на атомах. Введение сравнительно небольшой добавки ксенона в МЭЗ (парциальное давление до 50 Торр) снижает коэффициент диффузии ионов, что приводит к уменьшению утечки ионов из плазмы, в связи с этим уменьшаются необходимые энергетические затраты на объемную ионизацию пара цезия [8, 10].

По-видимому, когда давление ксенона будет заметно превышать давление пара цезия, полученная в работе зависимость учета дополнительных потерь напряжения на дуге недостаточно корректно описывает процессы рассеяния электронов в разряде, так как нарушается допущение о пренебрежении влиянием примеси инертного газа на температуру электронов и приэлектродные скачки потенциала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа существующих инженерных полуэмпирических методик расчета ВАХ ТЭП, работающего в дуговом режиме, предложена модифицированная методика построения ВАХ для ТЭП с МЭЗ заполненного смесью пара цезия и инертного газа.

Показано влияние парциального давления примеси (инертного газа ксенона) на величину дуговых потерь вследствие дополнительного рассеяния электронов на атомах примеси.

На основе разработанной модифицированной методики рассчитан набор ВАХ ТЭП, заполненного смесью пара цезия и ксенона. Предложено объяснение полученным результатам.

Данная методика показывает удовлетворительные результаты, если парциальное давление примеси инертного существенно не превышает давление цезия.

Дальнейшие исследования будут направлены на учет влияния парциальных давлений основных примесей, являющихся продуктами реакции деления топлива, с целью получения методики расчета ВАХ ТЭП, работающего в условиях, близких к реальным.

Список используемых источников

1. *Миронов В.С., Сидельников В.Н.* Предельные выходные характеристики ТЭП // Ядерная энергетика в космосе (май, 1990): тез. докл. – Ч. 1. – С. 90–92.
2. *Сидельников В.Н.* Универсальная одномерная модель TOR термоэмиссионного преобразователя // 29-я Международная конференция по инженерным проблемам преобразования энергии (IECES). Монтерей, США, 1994: сб. тр. – Т. 2. – С. 1078–1081.
3. *Квасников Л.А., Кайбышев В.З., Каландаришвили А.Г.* Рабочие процессы в термоэмиссионных преобразователях ядерных энергетических установок / под. ред. Л.А. Квасникова. – М.: Изд-во МАИ, 2001. – 208 с.
4. *Ушаков Б.А., Никитин В.Д., Емельянов И.Я.* Основы термоэмиссионного преобразования энергии. – М.: Атомиздат, 1974. – 288 с.

5. Analysis of the arc mode operation of the cesium vapor thermionic energy converter // Proceedings of the IEEE (May 1963). – Vol. 51. – P. 748–754.
6. Жеребцов В.А., Касиков И.И. Предельные характеристики термоэмиссионного преобразователя энергии // Атомная энергия. – 2011. – Т. 110, № 6. – С. 12–17.
7. Канатчинов А.К., Стаханов И.П. Вольтамперные характеристики низковольтного дугового разряда // Журнал технической физики. – 1969. – Вып. 8. – С. 1130–1135.
8. Макешева К.К., Канатчинов А.К. Моделирование вольтамперных характеристик низковольтной дуги термоэмиссионных преобразователей энергии // Известия НАН РК. – 2015. – Т. 6, № 304. – С. 71–77.
9. Физические основы термоэмиссионного преобразования энергии / И.П. Стаханов [и др.]. – М.: Атомиздат, 1973. – 374 с.
10. Rouclove P. Report A – 5 // Second Inter. Conf. on Thermionic Electrical Power Generation. Italy, Stresa, 1968. – P. 61.
11. Землянов А.Б., Косов Г.Л., Траубэ В.А. Система морской космической разведки и целеуказания (История создания). – СПб.: Галяя Принт, 2002. – 385 с.
12. 60 лет самоотверженного труда во имя мира. 1944–2004 / ФГУП «НПОмаш». – М.: ИД «Оружие и технологии», 2004.
13. Грязнов Г.М. Космическая атомная энергетика и новые технологии (Записки директора). – М.: ФГУП «ЦНИИатоминформ», 2007. – 136 с.
14. Работы КБ «Арсенал» по созданию космических аппаратов с ядерными энергетическими установками / Б.И. Полетаев [и др.] // Материалы конф. «Ядерная энергетика в космосе»: в 3 т. – М.: НИКИЭТ, 2005. – Т. 1. – С. 247–249.
15. Грязнов Г.М., Пупко В.Я. «ТОПАЗ-1». Советская космическая ядерно-энергетическая установка // Природа. – 1991. – Вып. 10. – С. 29–36.
16. Кухаркин Н.Е., Пономарев-Степной Н.Н., Усов В.А. Космическая ядерная энергетика (ядерные реакторы с термоэлектрическим и термоэмиссионным преобразованием – «Ромашка» и «Енисей») / под ред. акад. РАН Н.Н. Пономарева-Степного. – М.: Изд. Ат, 2008. – 146 с.
17. Космическая ядерная энергетика: перспективы и направления развития / П.В. Андреев [и др.] // Полет. – 2006. – № 4. – С. 19–25.
18. Луна шаг к технологиям освоения Солнечной системы / под научн. ред. В.П. Легостаева и В.А. Лопоты. – М.: РКК «Энергия», 2011. – 584 с.
19. Синявский В.В., Юдицкий В.Д. Планетная АЭС на основе термоэмиссионного реактора-преобразователя // Атомная энергия. – 2000. – Т. 89, № 1. – С. 20–22.

В.И. Половников,
доктор технических наук, профессор;
И.А. Фадин,
кандидат технических наук

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЙ КОСМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА ПО ИЗОБРАЖЕНИЮ, СОДЕРЖАЩЕМУ ЕГО ТРЕК

Постоянно возрастающая роль космических систем и средств в хозяйственной деятельности развитых стран приводит к увеличению количества объектов в околоземном космическом пространстве (ОКП). В свою очередь, увеличение количества космических объектов (КО) приводит к повышению вероятности возникновения опасных ситуаций в ОКП, заключающихся в высоких значениях показателей риска повреждения (разрушения) отечественных космических аппаратов (КА). Решение задачи предупреждения об опасных ситуациях в ОКП возложено на автоматизированную систему предупреждения об опасных ситуациях (АСПОС) в ОКП, функционирующую с 1 января 2016 года. Дальнейшее развитие АСПОС ОКП видится в создании системы информационно-аналитического обеспечения (ИАО) безопасности космической деятельности (БКД) в ОКП. Отличительной особенностью перспективной системы является наличие КА с целевой оптико-электронной аппаратурой (ОЭА) на борту. Условия функционирования бортовой ОЭА (БОЭА) характеризуются высокой угловой динамикой КО относительно КА-измерителя (КАИ), что вызывает смаз изображения КО. В статье предложен алгоритм, позволяющий определить положения КО в момент открытия и закрытия затвора БОЭА.

Ключевые слова: мониторинг космического пространства, алгоритм, обработка изображения, координаты.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно оценкам NASA, по состоянию на 4 октября 2020 года на околоземных орбитах находилось 21293 каталогизированных КО, большую часть которых составляют объекты космического мусора – неактивные КА, третьи ступени ракет-носителей, разгонные блоки, обломки, образовавшиеся в результате столкновений и самопроизвольных разрушений искусственных спутников Земли [1]. Некаталогизированных объектов размером более 1 см может быть несколько сот тысяч [2].

В соответствии с Основами государственной политики Российской Федерации в области космической деятельности на период до 2030 года и дальнейшую перспективу одной из основных задач обеспечения БКД является развитие средств и систем постоянного мониторинга ОКП [3]. Одним из направлений развития указанных систем и средств является создание орбитального сегмента (ОС) системы ИАО БКД в ОКП [2]. В качестве целевой аппаратуры КА, составляющих перспективный ОС, предполагается использовать оптико-электронные средства [2].

Особенностью функционирования БОЭА КАИ являются высокие угловые скорости движения КО относительно КАИ, приводящие к смазу изображения КО.

Таким образом, возникает задача выделения следов (треков) КО на кадре, содержащем помимо указанных треков изображения звезд и планет.

Результаты анализа существующего научно-методического задела в области выделения изображения КО выявили следующие основные подходы к решению указанной задачи:

- 1) определение положения КО на снимке как центра области, соответствующей изображению объекта [4, 5];
- 2) определение контуров КО на детальном изображении [6, 7];
- 3) выявление концов трека КО [8];
- 4) сравнительный анализ последовательности кадров [8, 9, 12];
- 5) привлечение оператора для принятия решения об обнаружении КО [13];
- 6) возврат порций «размазанного» реального сигнала в исходное положение [20].

Каждый из указанных подходов имеет свои преимущества и недостатки. Так, после выявления контуров изображения КО и его бинаризации, определение положения КО в средний момент времени интервала экспозиции возможно с использованием первого, второго и третьего подходов. Недостатком данного подхода является неполнота использования информации кадра, состоящая в том, что из множества положений КО за время экспозиции определяется всего одно. В условиях ограниченности поля зрения БОЭА и высоких угловых скоростей движения КО относительно КАИ ограничение количества измерительной информации, получаемой из одного кадра, может иметь решающее значение.

Четвертый способ требует нескольких кадров. Пятый неприменим в автоматическом режиме.

Шестой способ требует наличия информации о начальном положении КО и динамике его движения, что делает данный способ неподходящим для выявления новых объектов или определения параметров движения КА после совершения маневра. К недостаткам этого способа также следует отнести и тот факт, что за время экспозиции определяется одно положение объекта.

В настоящей статье представлен алгоритм, позволяющий определить положение КО на единичном изображении со смазом в момент открытия и закрытия затвора.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Дано: кадр, содержащий трек КО, шумы и изображения звезд и планет:

$$B = \{b_{ij}, i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}\}, \quad (1)$$

где b_{ij} – яркость пиксела, находящегося на пересечении i -ой строки и j -го столбца кадра;

I – количество строк изображения;

J – количество столбцов изображения.

Найти: положения КО на изображении в моменты открытия и закрытия затвора в системе координат кадра (ХОУ на рис. 1) (x_1, y_1) , (x_2, y_2) .

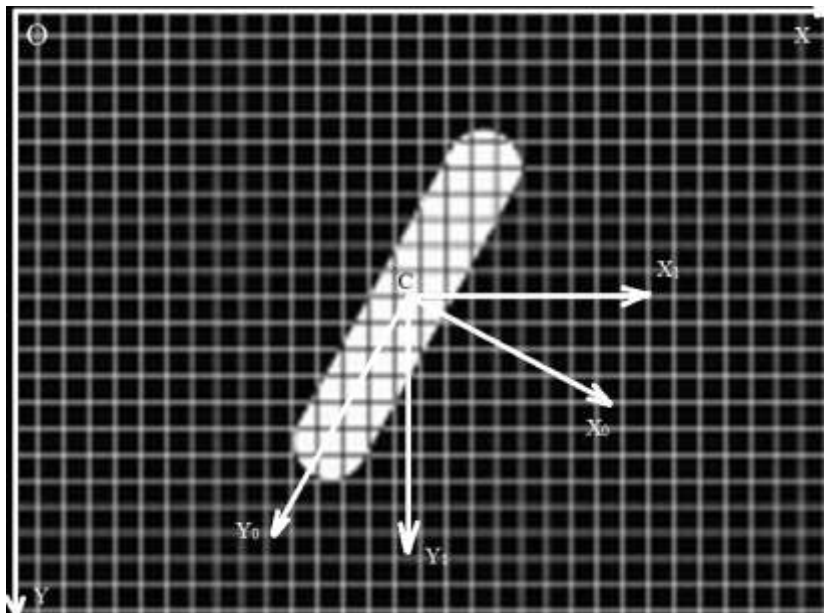


Рис. 1. Системы координат, используемые в алгоритме

Предварительная настройка алгоритма заключается в определении порога обнаружения (b_{\min}), при котором будет принято решение о принадлежности пиксела к изображению кандидата в КО. Значение b_{\min} зависит от характеристик прибора и существенно влияет на

чувствительность алгоритма. Правильный выбор b_{\min} необходим для обеспечения чувствительности, равной 1.

Для работы алгоритма необходимо, чтобы изображение было переведено в полутона серого.

ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА

1. Производится обработка кадра фильтром Гаусса для уменьшения шумов. В соответствии с [8] размер матрицы (ядра фильтра) принят 11×11 , среднее квадратическое отклонение $\sigma = 1$. Как следствие, края изображения шириной 5 пиксел не обрабатываются, поэтому точность определения координат КО вблизи края несколько ниже. Каждому пикселу сглаженного изображения за исключением краев указанной ширины присваивается значение

$$b_{ij} = \frac{\sum_{m=1, n=1}^{m=11, n=11} (g_{mn} b_{i-6+m, j-6+n})}{\sum_{m=1, n=1}^{m=11, n=11} g_{mn}}, \quad (2)$$

где

$$g_{mn} = \frac{e^{-\frac{(m-6)^2 + (n-6)^2}{2\sigma^2}}}{2\pi\sigma^2}. \quad (3)$$

2. Формируются массивы пикселей, соответствующих одному объекту. Для этого после нахождения точки с яркостью $b_{i_a j_a}^a > b_{\min}$ проверяются соседние 8 пикселей. Те из них, яркость которых не меньше порога обнаружения, также считаются принадлежащими рассматриваемому объекту:

$$Obj_a = \{b_{i_a j_a}^a, a = \overline{1, A}\}, \forall b_{i_a j_a}^a \in Obj_a \exists b_{i_{a_2} j_{a_2}}^{a_2} \mid |i_{a_1} - i_{a_2}| \leq 1, |j_{a_1} - j_{a_2}| \leq 1, \quad (4)$$

где A – количество изображений объектов в кадре.

3. Производится проверка массива Obj_a с целью выявления, является ли он изображением КО, в два этапа.

3.1. Отбрасываются массивы, содержащие меньше s_{\min} элементов. Параметр s_{\min} зависит от характеристик ОЭП. В предлагаемой реализации алгоритма $s_{\min} = 10$.

Смысл данного этапа состоит в отбрасывании одиночных или небольших групп пикселей. На этом этапе фильтрации отбрасываются шумы типа «соль» [8], неяркие звезды и планеты.

Этап 3.1 не вносит существенного вклада в специфичность алгоритма, однако позволяет снизить его временную сложность (*time complexity*) [18].

На следующий этап проверки подаются те массивы Obj_a , для которых

$$|Obj_a| \geq 10. \quad (5)$$

3.2. Определяются главные центральные моменты инерции изображения объекта. Для этого находятся координаты центра яркости изображения (точка C на рис. 1) в системе координат кадра:

$$x_C = \frac{\sum_{k=1}^K x_k b_k}{\sum_{k=1}^K b_k}, \quad (6)$$

$$y_c = \frac{\sum_{k=1}^K y_k b_k}{\sum_{k=1}^K b_k}, \quad (7)$$

где K – количество пикселей, принадлежащих изображению объекта;

x_k – абсцисса k -го пиксела изображения объекта в системе координат (СК) кадра;

y_k – ордината k -го пиксела изображения объекта в СК кадра.

Затем определяются центральные и центробежный моменты инерции изображения относительно осей X_1 и Y_1 (см. рис. 1), параллельным осям X и Y (сторонам кадра):

$$J_{X1} = \sum_{k=1}^K ((y_k - y_c)^2 b_k), \quad (8)$$

$$J_{Y1} = \sum_{k=1}^K ((x_k - x_c)^2 b_k), \quad (9)$$

$$J_{X1Y1} = \sum_{k=1}^K ((x_k - x_c)(y_k - y_c) b_k). \quad (10)$$

Угол поворота одной из главных центральных осей инерции изображения (X_0 и Y_0 на рис. 1) относительно оси X_1

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan \frac{2J_{X1Y1}}{J_{X1} - J_{Y1}}. \quad (11)$$

Главные центральные моменты инерции изображения

$$J_{X0} = J_{X1} \cos^2 \alpha + J_{Y1} \sin^2 \alpha - J_{X1Y1} \sin 2\alpha, \quad (12)$$

$$J_{Y0} = J_{Y1} \cos^2 \alpha + J_{X1} \sin^2 \alpha + J_{X1Y1} \sin 2\alpha. \quad (13)$$

Для определенности в дальнейшем считается, что ось Y_0 направлена по оси трека.

После нахождения главных центральных моментов инерции объекты, изображения для которых $\frac{J_{X0}}{J_{Y0}} > 10$ (значение определено экспериментально как минимальное, обеспечивающее специфичность алгоритма. Большее значение этого фильтра может привести к уменьшению чувствительности алгоритма за счет ложного отбрасывания коротких треков КО), считаются принадлежащим КО.

На основе предположения, что изображение трека КО является почти осесимметричным (без наличия помех и при бесконечно малом размере пиксела изображение было бы полностью симметричным) и что трек КО является прямолинейным, сделан вывод, что в каждый момент времени объект находится на той главной оси инерции изображения, момент инерции относительно которой меньше (на большой оси эллипса инерции изображения), т. е. на оси Y_0 (см. рис. 1). Таким образом, абсциссы КО в момент открытия и закрытия затвора в СК X_0CY_0

$$x_{10} = 0, x_{20} = 0. \quad (14)$$

4. Определяются ординаты точек пересечения оси Y_0 с границами трека y_{e01} и y_{e02} (ординаты концов трека). Для этого методом бикубической интерполяции определяются яркости точек трека, лежащих на оси Y_0 , с шагом в 1 пиксел. Процедура определения яркостей продолжается, пока справедливо условие

$$b(y_{0l}) \geq b_{\min},$$

где l – номер точки на оси Y_0 . Начало отсчета точек совпадает с точкой C – центром яркости трека КО. К полученному массиву яркостей добавляются по одной точке с яркостями меньше b_{\min} с разных сторон трека. Определяются коэффициенты p, q, r, s кубического сплайна, интерполирующего яркость трека [19]:

$$b_l(y_0) = p_l + q_l(y_0 - y_{0l}) + r_l(y_0 - y_{0l})^2 + s_l(y_0 - y_{0l})^3. \quad (15)$$

На границе трека (y_{e0}) [8]

$$b''_{y_0}(y_{e0}) = 0. \quad (16)$$

Из (15) и (16)

$$y_{e01} = y_{01} - \frac{r_1}{3s_1},$$

$$y_{e02} = y_{0L} - \frac{r_L}{3s_L}, \quad (17)$$

где L – количество точек на оси Y_0 .

5. По направлению от концов трека к точке C (рис. 1) определяется полуширина трека в l -ом сечении:

$$w_{2l} = \frac{x_{e20l} - x_{e10l}}{2}, \quad (18)$$

где x_{e10l} и x_{e20l} – абсциссы точек пересечения оси, параллельной оси CX_0 и проходящей через l -ю точку на оси CY_0 , с границей трека (для определенности $x_{e10l} < 0, x_{e20l} > 0$). С одного конца $l = 2, 3, \dots$, с другого – $l = L - 1, L - 2, \dots$

Порядок определения x_{e10l} и x_{e20l} аналогичен описанному в п. 4.

6. Определяются коэффициенты p_w, q_w, r_w и s_w кубической сплайн-интерполяции полуширины трека:

$$w_2(y_0) = p_w + q_w(y_0 - y_{0l}) + r_w(y_0 - y_{0l})^2 + s_w(y_0 - y_{0l})^3. \quad (19)$$

7. Определяются значения ординат y_{w10} и y_{w20} , ближайших к y_{e01} и y_{e02} соответственно, для которых

$$w_2''(y_{w10}) = 0, \quad (20)$$

$$w_2''(y_{w20}) = 0. \quad (21)$$

Из (19)–(21)

$$y_{w10} = y_{0l_1} - \frac{r_{l_1}}{3s_{l_1}}, \quad (22)$$

$$y_{w20} = y_{0l_2} - \frac{r_{l_2}}{3s_{l_2}}, \quad (23)$$

где l_1 и l_2 – номера точек, являющихся правыми границами интервалов, на которых выполняются условия (4) и (5) соответственно.

8. Определяются значения полуширины трека в сечениях y_{w10} и y_{w20} :

$$w_{e21} = w_2(y_{w10}), \quad (24)$$

$$w_{e22} = w_2(y_{w20}). \quad (25)$$

9. Определяются ординаты КО в момент открытия и закрытия затвора в СК X_0CY_0 :

$$y_{10} = y_{e01} + w_{e21}, \quad (26)$$

$$y_{20} = y_{e02} - w_{e22}, \quad (27)$$

где для определенности полагается $y_{e01} < 0$, $y_{e02} > 0$, т. е. y_{10} – точка пересечения оси Y_0 с границей трека, соответствующая отрицательной аппликате, y_{20} – положительной.

10. Определяются координаты КО в момент открытия и закрытия затвора в СК X_1CY_1 :

$$x_{11} = -y_{10}\sin\alpha, \quad (28)$$

$$y_{11} = y_{10}\cos\alpha, \quad (29)$$

$$x_{21} = -y_{20}\sin\alpha, \quad (30)$$

$$y_{21} = y_{20}\cos\alpha. \quad (31)$$

11. Определяются координаты КО в момент открытия и закрытия затвора в СК XOY :

$$x_1 = -y_{11} + x_C, \quad (32)$$

$$y_1 = y_{11} + y_C, \quad (33)$$

$$x_2 = -y_{21} + x_C, \quad (34)$$

$$y_2 = y_{21} + y_C. \quad (35)$$

Представленный алгоритм позволяет учесть изменение ширины трека, связанное с изменением видимого блеска КО (рис. 2).

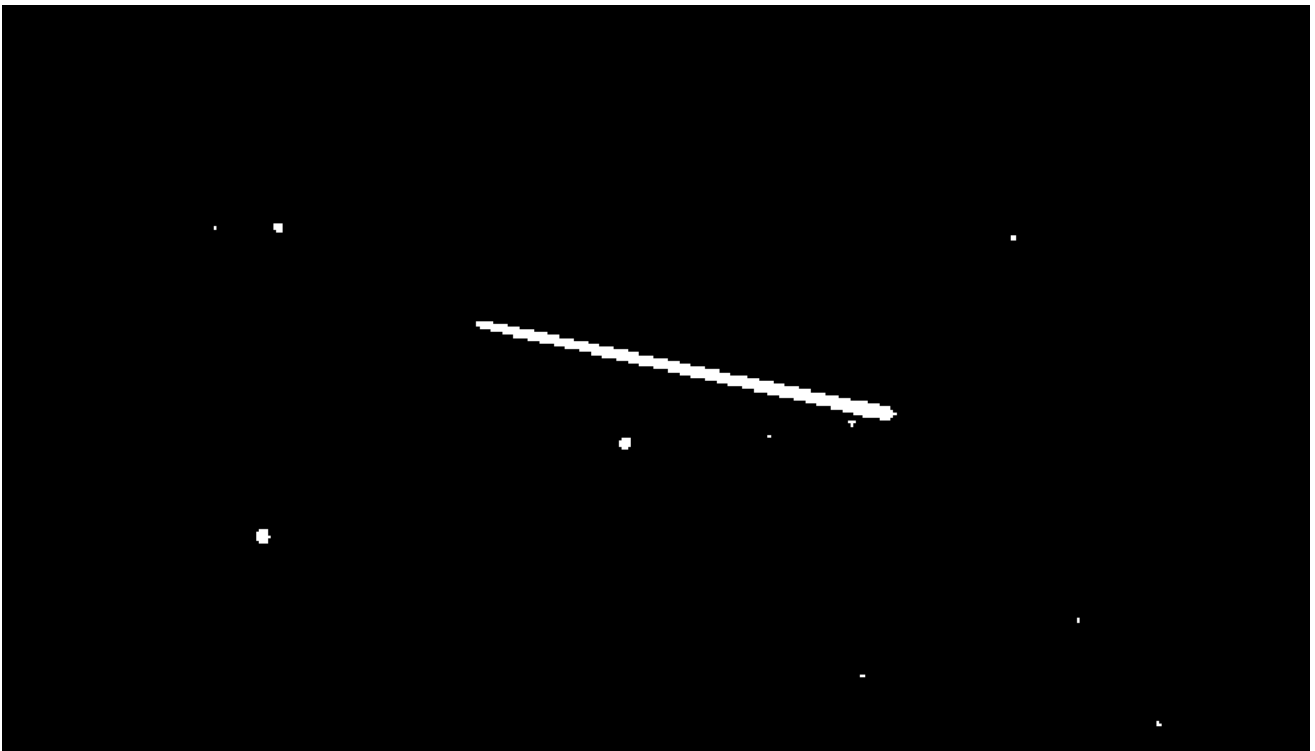


Рис. 2. Бинаризованный по пороговому значению яркости трек КО переменной ширины

Научная новизна полученного результата состоит в использовании эллипса инерции изображения для определения отличия изображения КО от изображений других объектов (звезд, планет), а также для определения оси трека КО.

Разработанный алгоритм реализован на языке C++ с использованием библиотеки QT.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ АЛГОРИТМА

Для проверки работоспособности алгоритма использованы реальные космические снимки, на которых КО неразрешаем, взятые из открытых источников. При этом оценивались следующие показатели [8]:

$$Sensitivity = \frac{TP}{TP + FN}, \quad (36)$$

$$Specificity = \frac{TN}{FP + TN}, \quad (37)$$

где TP – количество верных положительных решений об обнаружении КО;
 FN – количество ложных отрицательных решений об обнаружении КО;
 TN – количество верных отрицательных решений об обнаружении КО;
 FP – количество ложных положительных решений об обнаружении КО.

Результаты применения алгоритма представлены в табл. 1.

Правильный подбор порогового значения яркости b_{\min} для каждого телескопа обеспечивает чувствительность и специфичность, равные 1 (табл. 1).

Результаты анализа изображений показывают, что учет полуширины трека позволяет повысить точность определения положения КО в сравнении с [8] в среднем на 2 пиксела.

Время выполнения алгоритма помимо характеристик вычислительной машины зависит от размеров изображения и трека.

Таблица 1

Результаты применения алгоритма

Параметр	Значение
Чувствительность (<i>Sensitivity</i>)	1
Специфичность (<i>Specificity</i>)	1
Среднее время анализа единичного трека, с	17
Среднее повышение точности определения положения КО в сравнении с известным методом, основанным на поиске границ трека [8], пиксел	2

Проверка времени выполнения алгоритма показала, что на компьютере с процессором Intel Core i5-9600K с операционной системой Windows 10 при выполнении вычислений в один поток координаты КО на изображении размером 1300×870 пикселей определяются в среднем за 17 секунд при длине трека 250 пикселей.

Ограничение применения предложенного алгоритма состоит в том, что применение разработанного алгоритма возможно тогда, когда трек КО не пересекается с треком другого КО. При наличии пересекающихся треков целесообразно использовать преобразование Хафа [13] или преобразование Радона [14–16].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный в статье алгоритм позволяет на одном кадре определить два положения КО: в момент открытия и закрытия затвора, что удваивает количество получаемой с одного кадра информации в сравнении с известным алгоритмом, основанным на определении положения центра яркости [4, 20].

Новизна полученного научного результата состоит в использовании главных центральных осей инерции, что позволяет определить ось и полуширину трека для увеличения точности определения координат КО.

Для выявления того, какие координаты соответствуют моменту открытия затвора, а какие – моменту закрытия, можно определить направление движения КО, воспользовавшись последовательностью кадров.

Представленный в статье алгоритм предлагается использовать в бортовой цифровой вычислительной машине КА ОС системы ИАО БКД в ОКП для решения задачи анализа снимков на борту КАИ.

Дальнейшим направлением совершенствования программной реализации разработанного алгоритма с целью вычисления координат КО во второй экваториальной СК на борту КАИ является реализация параллельных вычислений, а также создание программного продукта, реализующего совместное применение разработанного и представленных в [17] алгоритмов.

Список используемых источников

1. Orbital Debris Quarterly News. – NASA. – November 2020. – Vol. 24, I. 4. –12 p.
2. Концепция создания системы информационно-аналитического обеспечения безопасности космической деятельности в околоземном космическом пространстве «Млечный путь» на период 2020–2025 годов и на перспективу до 2035 года (проект). – М.: ЦНИИМАШ, 2020. – 38 с.
3. Основы государственной политики Российской Федерации в области космической деятельности на период до 2030 года и дальнейшую перспективу [утв. Президентом РФ от 19.04.2013 N Пр-906]. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_145908 (дата обращения: 16.06.2021).
4. *Зыков И.И.* Методы и алгоритм обнаружения антропогенных частиц в сложных фоновых условиях функционирования оптико-электронных систем: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01. – Тверь, 2018. – 114 с.
5. *Палюх Б.В., Зыков И.И.* Программные средства вейвлет-фрактально-корреляционного метода обнаружения объектов космического мусора // Программные продукты и системы. – 2018. – № 2. – С. 414–417.
6. Робастный алгоритм выделения космического объекта на снимке невысокого качества / Шигаев А.К. [и др.] // Труды МАИ. – Вып. № 82. – URL: http://www.trudymai.ru/upload/iblock/f84/shigaev_luchkin_mashkin_tyurin_rus.pdf (дата обращения: 16.06.2021).
7. Адаптивный метод и алгоритм обнаружения малоконтрастных объектов оптико-электронным средством / Катулев А.Н. [и др.] // Оптический журнал. 2014. – Вып. № 81, 2. – С. 29–39.
8. *Bernader K.B.* A Method for Detecting Resident Space Objects and Orbit Determination Based on Star Trackers and Image Analysis. – Uppsala Universitet, 2014. – 54 p.
9. *Зверев П.С., Довгаль В.М.* Метод и алгоритм распознавания искусственных околоземных объектов и «мусора» для обеспечения безопасности космических полетов // Вестник ВГТУ. – 2010. – № 4. – С. 105–109.
10. *Трещалин А.П.* Применение оптико-электронной аппаратуры космических аппаратов для предварительного определения параметров орбит околоземных космических объектов // Труды МФТИ. – 2012. – Т. 4, № 3. – С. 122–131.
11. *Xueyang Zhang, Junhua Xiang, Yulin Zhang.* Space Object Detection in Video Satellite Images Using Motion Information // Hindawi International Journal of Aerospace Engineering. – 2017. [Электронный ресурс]. – URL: <https://downloads.hindawi.com/journals/ijae/2017/1024529.pdf> (дата обращения: 16.06.2021).
12. *Xianheng Zeng, Hanxu Sun.* Interactive Image Recognition of Space Target Objects // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – URL: https://www.researchgate.net/publication/321981843_Interactive_Image_Recognition_of_Space_Target_Objects (дата обращения: 16.06.2021).

13. *Princen J.P., Illingworth J., Kittler J.V.* A Formal Definition of the Hough Transform: Properties and Relationships // *Journal of Mathematical Imaging and Vision*. – 1992. – Vol. 1, № 1. – P. 153–168.
14. *Toft P.A.* The Radon Transform: Theory and Implementation: PhD Thesis. – Technical University of Denmark, 1996. – 308 p.
15. A Fast Hough Transform for the Parametrisation of Straight Lines using Fourier Methods / *Cheyne Gaw Ho [et al.]* // *Real-Time Imaging*. – 2000. – Vol. 6, num. 2. – P. 113–127.
16. *Donoho D. Xiaoming H.* Applications of Beamlets to Detection and Extraction of Lines, Curves and Objects in Very Noisy Images // *Nonlinear Signal and Image Processing (NSIP)*, 2001. – URL: <https://cpn-us-w2.wpmucdn.com/sites.gatech.edu/dist/b/261/files/2015/10/nsip0309011.pdf> (дата обращения: 16.06.2021).
17. *Койнаш Б.В., Половников В.И., Скутницкий В.М.* Определение положений космических объектов при наблюдениях с подвижного измерителя на фоне звездного неба // *Сообщения Института прикладной астрономии РАН № 129*. – СПб., 1999. – 40 с.
18. *Michael Sipser.* Introduction to the Theory of Computation. – Course Technology Inc, 2006. – 431 p.
19. C++ cubic spline library. – URL: <https://github.com/ttk592/spline> (дата обращения: 16.06.2021).
20. *Пашков В.С.* Влияние «смаза» изображения на точность оценки его координат // *Современные проблемы определения ориентации и навигации космических аппаратов*. – М.: ИКИ РАН, 2008. – С. 225–230.

С.Б. Силантьев,
кандидат технических наук, доцент

ВЫВЕДЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА ГЕОСТАЦИОНАРНУЮ ОРБИТУ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ УНИВЕРСАЛЬНЫХ РОБОТИЗИРОВАННЫХ КОСМИЧЕСКИХ ПЛАТФОРМ

В статье изложены концептуальные положения, определяющие направления развития объектов ракетно-космической техники. Рассмотрены альтернативные способы выведения полезных нагрузок на высокие орбиты. Представлены результаты оценивания эффективности выведения космического аппарата с низкоорбитальной универсальной космической платформы на геостационарную орбиту.

Ключевые слова: космический аппарат, многоэтапный способ выведения, полезная нагрузка, разгонный блок, ракета-носитель, средства выведения, универсальная роботизированная космическая платформа.

ВВЕДЕНИЕ

Для того чтобы обеспечить лидерство России в ракетно-космической сфере, необходимо иметь возможность оперативно доставлять полезную нагрузку (ПН) любой массы на любую орбиту. В настоящее время основными средствами выведения (СВ) космических аппаратов (КА) на орбиту являются ракеты-носители (РН) и разгонные блоки (РБ). Существующие способы и средства выведения уже не позволяют удовлетворить растущие требования по массе ПН и оперативности развертывания и восполнения орбитальной группировки (ОГ) КА.

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ОБЪЕКТОВ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Есть несколько способов решения проблемы доставки любых грузов на любые орбиты. К основным способам следует отнести разработку и создание:

- 1) сверхтяжелых РН;
- 2) универсальных роботизированных космических платформ (УРКП) (баз) на различных орбитах (планетах).

Необходимо использовать оба способа, но второй является предпочтительным по следующим причинам:

1) универсальность УРКП, заключающаяся в том, что они могут быть использованы и как стартовые площадки для дальних полетов, и для размещения на них космического сегмента систем различного целевого назначения;

2) УРКП можно создавать путем доставки ее составных модулей существующими СВ. Опыт создания подобного рода платформ уже имеется – это Международная космическая станция (МКС).

Как писал академик Б.Е. Черток в своей статье, опубликованной в журнале «Российский космос» № 7 за 2009 год [1], еще в начале 60-х годов прошлого века при рассмотрении казавшихся тогда полуфантастических проектов С.П. Королев высказал идею разработки тяжелых космических платформ, обладающих большой электрической энергетикой. В этой же статье автором было отмечено, что проведенные исследования показали принципиальную возможность решения проблемы вывода больших масс на геостационарную орбиту (ГСО) без сверхтяжелых носителей.

О возможности создания и перспективах использования космических станций (платформ) двойного назначения указывалось в источниках [2, 3].

По информации РИА «Новости» от 6 ноября 2020 года [4] член коллегии Военно-промышленной комиссии России, курирующий ракетно-космическую отрасль, Александр Иванов в своем интервью рассказал о концепте новой российской орбитальной станции. По конструкции станция будет похожа на «Мир». В ее состав войдут как минимум пять модулей: базовый; целевой производственный; модуль материального обеспечения (склад); модуль-платформа (стапель) для сборки, запуска, приема и обслуживания космических аппаратов; коммерческий для размещения четырех туристов. Выводить модули на орбиту планируется с космодрома Плесецк или Восточный, а сами модули собираются создать на базе еще не построенного научно-энергетического модуля МКС. Кроме того, планы предусматривают регулярную пристыковку к станции свободнолетающего производственного модуля-лаборатории, который предполагается запустить на РН «Союз-2.1б» с Плесецка или Восточного.

Так как разработка и создание объектов ракетно-космической техники требует больших затрат, необходимо обозначенную проблему решать поэтапно.

I этап. Создание УРКП на низкой орбите – низкоорбитальная УРКП (УКРПН).

Низкоорбитальная УРКП (УКРПН) создается либо на базе существующей МКС (возможно совместно с американцами, что для нас было бы более экономично), либо на базе своей новой космической станции. Эта УРКП эксплуатируется с участием космонавтов и космических роботов (КР). Космонавты – основные, КР – помогают космонавтам и одновременно проходят отработку под контролем космонавтов с целью дальнейшего перераспределения функций: КР становятся основными, а космонавты контролируют КР и помогают им.

На УРКП создается космическая инфраструктура для запусков ПН, подобная наземной космической инфраструктуре, только гораздо проще. В ее состав должны войти:

– хранилища доставленных грузов (РБ и КА высокой заводской готовности (ВЗГ), компоненты топлива, ЗИП);

– стартовые позиции (СП), на которых собираются орбитальные блоки (ОБ) в составе РБ и КА ВЗГ, и осуществляется их запуск. СП предположительно должны быть простой конструкции. Как вариант: составные части ОБ лежат на тележках, продольная ось которых совпадает с направлением движения УРКП, одна тележка подводится к другой, КА стыкуется с РБ (РБ может стыковаться с другим РБ), проводятся проверочные включения и при положительном результате этих включений осуществляется пуск. Чтобы минимизировать воздействие на УРКП, пуск можно осуществить с помощью пружинных толкателей, которые дадут ОБ небольшой импульс скорости, уводящий ОБ от УРКП. После отхода ОБ на безопасное расстояние запускается двигательная установка РБ. В общем случае, пуск может быть проведен с любым азимутом и под любым углом наклона к УРКП с учетом обеспечения безопасности УРКП.

На УРКП создаются космические сегменты систем различного целевого назначения.

II этап. Создание УРКП на ГСО – высокоорбитальная УРКП (УРКПВ).

Она создается в основном за счет доставки составных частей с УРКПН и, при необходимости, с Земли. Эта УРКП эксплуатируется КР. В состав УРКПВ может быть включен обитаемый модуль для космонавтов. При наличии космонавтов они контролируют и помогают КР, а также решают дополнительные задачи.

Аналогично работам I этапа на УРКПВ создаются космическая инфраструктура для запусков ПН и космические сегменты систем различного целевого назначения.

III этап. Создание УРКП на Луне или на одной из планет Солнечной системы – планетная УРКП (УРКПП), а также на средней орбите – среднеорбитальная УРКП (УРКПС).

Аналогично работам I и II этапов на УРКПП и УРКПС создаются космические инфраструктуры для запусков ПН и космические сегменты систем различного целевого назначения.

Следующие этапы аналогичны предыдущим и обеспечивают дальнейшее освоение космического пространства.

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ СПОСОБЫ ВЫВЕДЕНИЯ ПОЛЕЗНЫХ НАГРУЗОК НА ВЫСОКИЕ ОРБИТЫ

Как было отмечено выше существующие способы и средства выведения уже не позволяют удовлетворить растущие требования по массе ПН и оперативности развертывания и восполнения ОГ КА. В качестве альтернативных могут быть предложены следующие способы выведения ПН на орбиту.

1-й способ – парный пуск РН.

В качестве ПН для одной РН выступает КА, для другой РБ повышенной грузоподъемности. Обе ПН выводятся на опорную орбиту и стыкуются друг с другом. После чего РБ выводит КА на заданную орбиту. В качестве примера может быть взят один из способов запуска КА на Луну [5], иллюстрация которого представлена на рис. 1.

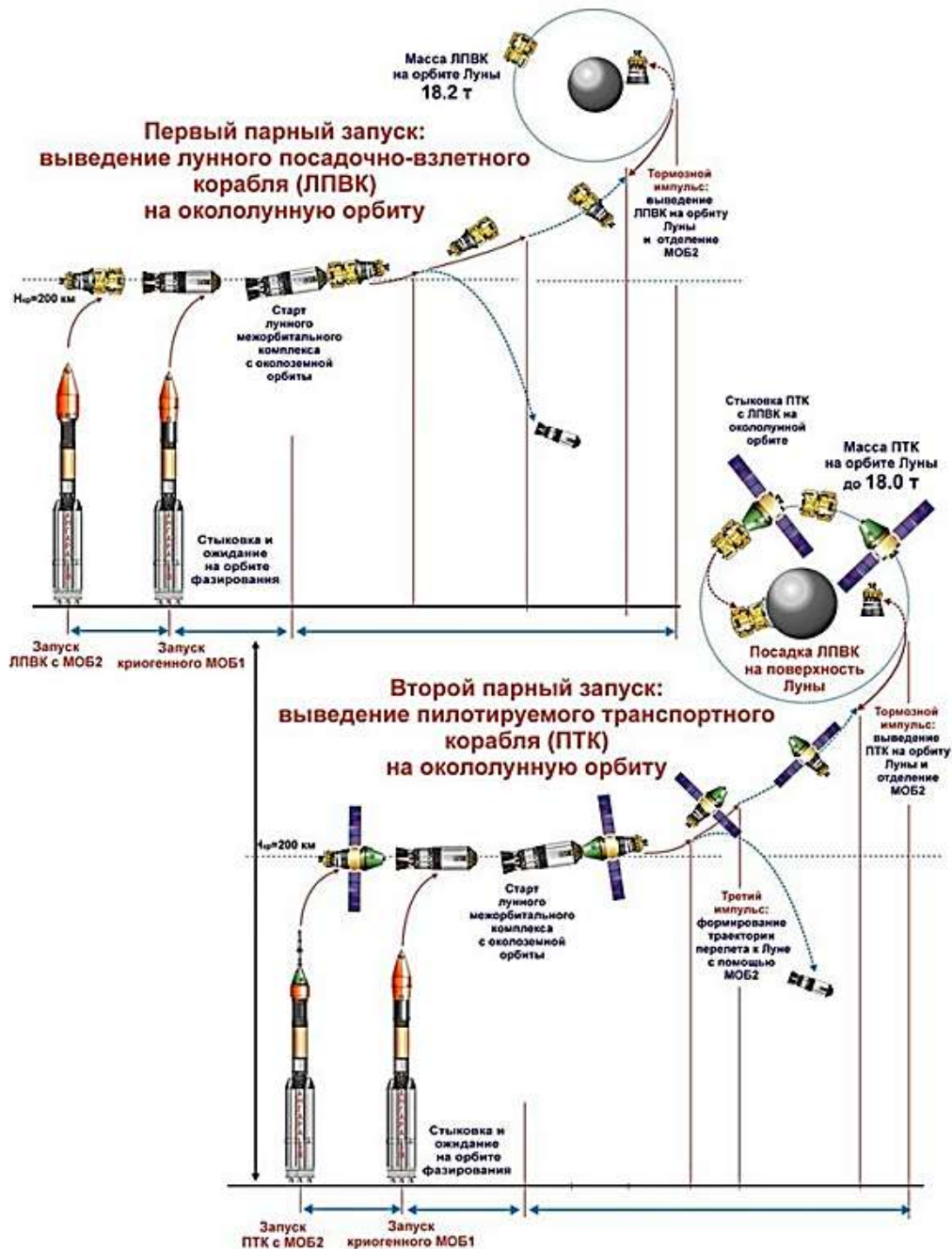


Рис. 1. Способ запуска КА на Луну

Недостатками такого способа являются:

- использование тяжелых или сверхтяжелых РН;
- решение только одной конкретной задачи;
- невозможность парирования нештатных ситуаций, которые могут возникнуть в процессе стыковки двух ПН и при запуске ДУ РБ.

2-й способ – запуск КА с УРКП.

Ракеты-носители доставляют на низкую околоземную орбиту комплектующие модули, которые затем собираются в УРКП. Прототипом УРКП может являться МКС (рис. 2). Для доставки комплектующих УРКП модулей можно использовать любые существующие РН.



Рис. 2. Международная космическая станция

После сборки УРКП на нее доставляются различные грузы (КА, КР, РБ, комплектующие космических сегментов систем различного целевого назначения, обеспечивающие модули и конструкции и т. п.). КА и РБ стыкуются между собой, после чего проводится пуск, и ПН с помощью РБ выводится на более высокую орбиту. В качестве ПН могут выступать различные комбинации КА и РБ в зависимости от поставленных задач. Проводится сборка космических сегментов систем различного целевого назначения и их включение. Работы проводятся космонавтами и КР. В случае возникновения нештатных ситуаций принимаются меры по их парированию.

Основное достоинство данного способа – это возможность выведения ПН большой массы существующими СВ на различные орбиты, включая отлетные межпланетные траектории.

Основной его недостаток – это необходимость обеспечения в условиях космического пространства приема, размещения, сборки, проверки и запуска различных грузов. Но указанный недостаток с каждым годом становится все менее значимым за счет постоянного совершенствования опыта работы космонавтов на борту орбитальной станции, а также за счет активного развития космической робототехники.

ОЦЕНИВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫВЕДЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С НИЗКООРБИТАЛЬНОЙ РОБОТИЗИРОВАННОЙ УНИВЕРСАЛЬНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ НА ГЕОСТАЦИОНАРНУЮ ОРБИТУ

В качестве показателей эффективности процесса выведения примем массу КА, доставляемого на ГСО, и расход компонентов топлива.

Рассмотрим двухимпульсную схему перевода КА с одной орбиты на другую.

Компланарный переход с одной круговой орбиты на другую. Энергетически оптимальный переход между двумя круговыми компланарными орбитами обычно осуществляется по эллипсу Хомана [6]. Схема такого перехода показана на рис. 3.

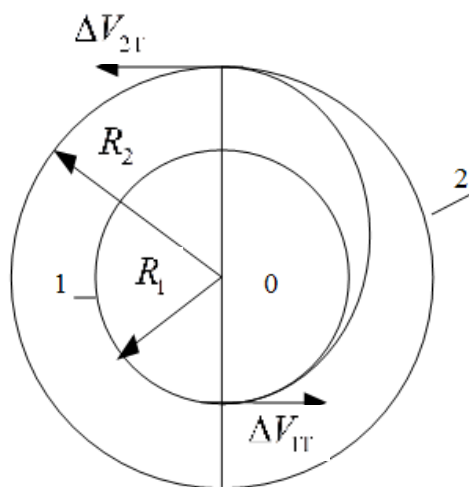


Рис. 3. Переход с орбиты на орбиту по эллипсу Хомана

Перигей переходной орбиты находится в точке схода с исходной круговой орбиты 1, а апогей – в точке выхода на целевую орбиту 2. Угловая дальность орбитального перехода составляет 180° . РБ с КА движется по исходной орбите с круговой скоростью

$$V_{1\text{кр}} = \sqrt{\frac{\mu}{R_1}}, \quad (1)$$

где $\mu = 398600,4418 \text{ км}^3/\text{с}^2$ – постоянная тяготения Земли.

Для схода с орбиты подается импульс $\Delta V_{1Г}$, величина которого определяется как

$$\Delta V_{1Г} = V_{\text{п}} - V_{1\text{кр}}, \quad (2)$$

где $V_{\text{п}}$ – скорость в перигее переходного эллипса.

Значение скорости $V_{\text{п}}$ находится по формуле эллиптической скорости:

$$V_{\text{п}} = \sqrt{2\mu \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{2a} \right)}, \quad (3)$$

где a – большая полуось переходного эллипса, определяемая как

$$a = 0,5(R_1 + R_2). \quad (4)$$

В точке 2 выхода на целевую орбиту объект имеет скорость $V_{\text{а}}$ – скорость в апогее переходного эллипса, которая определяется выражением

$$V_{\text{а}} = \sqrt{2\mu \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{2a} \right)}. \quad (5)$$

Для перехода на целевую орбиту необходимо подать импульс $\Delta V_{2Г}$, чтобы достигнуть скорости $\Delta V_{2\text{кр}}$. Очевидно, что

$$\Delta V_{2Г} = V_{1кр} - V_a, \quad (6)$$

где

$$V_{2кр} = \sqrt{\frac{\mu}{R_2}}. \quad (7)$$

Суммарные затраты характеристической скорости на такой компланарный переход оцениваются по формуле

$$\Delta V_k = \Delta V_{1Г} + \Delta V_{2Г}. \quad (8)$$

Импульсы $\Delta V_{1Г}$ и $\Delta V_{2Г}$ прикладываются в тангенциальных направлениях, т. е. в направлении вектора скорости.

При запуске КА на геостационарную орбиту с космодромов России требуется проведение дополнительного энергоемкого маневра, связанного с довольно существенным изменением наклона орбиты. При запуске КА с экватора необходимость проведения этого маневра отпадает.

Маневр поворота плоскости орбиты. Пусть в исходном состоянии РБ с КА движется по круговой орбите со скоростью $V_{кр}$. Необходимо найти импульс скорости $\Delta V_{п}$, который обеспечивает мгновенный поворот плоскости исходной орбиты на заданный угол α (рис. 4).

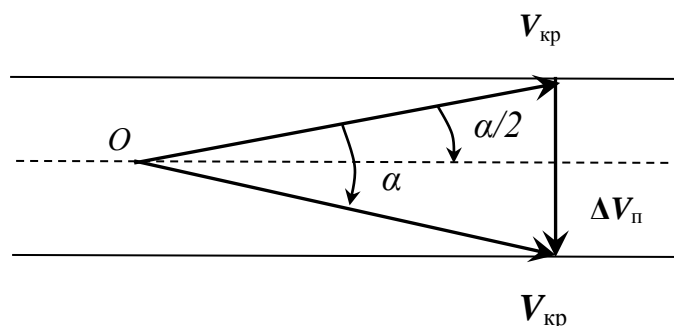


Рис. 4. Импульс скорости для поворота плоскости орбиты

Из рис. 4 видно, что величины $\Delta V_{п}$, $V_{кр}$ и α связаны между собой соотношением

$$\frac{\Delta V_{п}}{2} = V_{кр} \sin \frac{\alpha}{2},$$

поэтому

$$\Delta V_{п} = 2V_{кр} \sin \frac{\alpha}{2}. \quad (9)$$

При малых α

$$\sin \frac{\alpha}{2} \approx \frac{\alpha}{2}.$$

Следовательно,

$$\Delta V_{п} \approx V_{кр} \alpha.$$

Для осуществления поворота импульс ΔV_{Π} должен быть направлен под углом $(90^\circ - \alpha/2)$ к плоскости исходной орбиты.

Общие суммарные затраты характеристической скорости на такой орбитальный переход оцениваются по формуле

$$\Delta V_{\Sigma} = \Delta V_{\kappa} + \Delta V_{\Pi}. \quad (10)$$

На основании изложенного рассчитаем приращение характеристической скорости, которую необходимо сообщить КА для перевода его с низкой околоземной орбиты (НОО) высотой $H_{НОО} = 200$ км ($R_{НОО} = 6578$ км) и наклонением $i = 51,6^\circ$ на ГСО высотой $H_{ГСО} = 35786$ км ($R_{ГСО} = 42164$ км) и наклонением $i = 0^\circ$. В соответствии с выражениями (1–10) получаем $V_{1кр} = 7788$ м/с, $V_{\Pi} = 10245$ м/с, $\Delta V_{1Г} = 2457$ м/с, $V_a = 1596$ м/с, $V_{2кр} = 3075$ м/с, $\Delta V_{2Г} = 1479$ м/с, $\Delta V_{\Pi} = 1389$ м/с, $\Delta V_{\Sigma} = 5325$ м/с.

В качестве примера рассмотрим выведение КА на ГСО с помощью РН «Протон-М» и РБ «Бриз-М». РН «Протон-М» выводит на низкую околоземную орбиту высотой 200 км и наклонением $i = 51,6^\circ$ полезную нагрузку массой 22 тонны ($m_{ПН}$). Полезной нагрузкой для РН является ОБ в составе РБ «Бриз-М» и КА. Характеристики РБ «Бриз-М» следующие:

- масса конструкции $m_{\text{констр РБ}} = 2,4$ тонны;
- максимальная масса топлива $m_{\text{Т РБ max}} = 20$ тонн;
- удельный импульс ДУ $I_{\text{ДУ РБ}} = 3300$ м/с.

В соответствии с формулой К.Э. Циолковского

$$\Delta V = I_{\text{ДУ}} \ln \frac{m_0}{m_{\kappa}} \quad (11)$$

получаем

$$m_{\kappa} = m_{\text{ПН}} e^{-\frac{\Delta V_{\Sigma}}{I_{\text{ДУ РБ}}}} = 22 e^{-\frac{5325}{3300}} = 4,4 \text{ тонны}. \quad (12)$$

С учетом массы конструкции РБ масса КА, выводимого на ГСО, будет

$$m_{\text{КА}} = m_{\kappa} - m_{\text{констр РБ}} = 4,4 - 2,4 = 2 \text{ тонны}.$$

Масса компонентов топлива РБ составит $m_{\text{Т РБ}} = 22 - 4,4 = 17,6$ тонны.

Оценим массу КА, выводимого на ГСО средством выведения, полученным в результате сборки на УРКПН двух полезных нагрузок, которые доставляются двумя РН «Протон-М». Первой полезной нагрузкой является только РБ «Бриз-М» (РБ1), масса топлива которого, ввиду отсутствия КА, увеличена на 2 тонны и составляет $m_{\text{Т РБ1}} = 19,6$ тонны. Вторая полезная нагрузка аналогична рассмотренной выше – ОБ в составе РБ «Бриз-М» (РБ2) и КА. Выведение КА с УРКПН на ГСО будет состоять из двух участков: на первом участке работает РБ1; на втором участке – РБ2. Рассмотрим каждый участок в отдельности.

1-й участок. На этом участке начальная масса равна сумме масс двух ПН, а именно

$$m_0 = 2 m_{\text{ПН}} = 2 \cdot 22 = 44 \text{ тонны}.$$

Конечная масса равна сумме масс одной ПН и конструкции РБ, а именно

$$m_{\kappa} = m_{\text{ПН}} + m_{\text{констр РБ}} = 22 + 2,4 = 24,4 \text{ тонны}.$$

В соответствии с формулой К.Э. Циолковского (11) определим значение приращения скорости, которое будет создано РБ1:

$$\Delta V_{РБ1} = 3300 \ln \frac{44}{24,4} = 1945 \text{ м/с.}$$

Приращение скорости, которое должно быть создано РБ2 составляет

$$\Delta V_{РБ2} = \Delta V_{\Sigma} - \Delta V_{РБ1} = 5325 - 1945 = 3380 \text{ м/с.}$$

2 участок. На этом участке начальная масса равна массе одной ПН, а именно

$$m_0 = m_{ПН} = 22 \text{ тонны.}$$

В соответствии с выражением (12) определим значения конечной массы груза, выводимого на ГСО:

$$m_k = m_{ПН} e^{-\frac{\Delta V_{\Sigma}}{I_{ДУ РБ}}} = 22 e^{-\frac{3380}{3300}} = 7,9 \text{ тонн.}$$

С учетом массы конструкции РБ масса КА, выводимого на ГСО, будет составлять

$$m_{КА} = m_k - m_{констр РБ} = 7,9 - 2,4 = 5,5 \text{ тонны.}$$

Масса компонентов топлива РБ2 составит $m_{Т РБ2} = 22 - 7,9 = 14,1$ тонны.

Суммарные затраты топлива составят $m_{Т РБ\Sigma} = m_{Т РБ1} + m_{Т РБ2} = 19,6 + 14,1 = 33,7$ тонны.

Таким образом, масса КА, выводимого с УРКПН на ГСО, составит 5,5 тонны, суммарные затраты топлива РБ – 33,7 тонны. Отдельные пуски двух РН с РБ позволяют вывести два КА, масса каждого из которых составляет 2 тонны, а в сумме 4 тонны, при этом суммарные затраты топлива двух РБ – 35,2 тонны. Полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности выведения КА с УРКПН на ГСО по сравнению с отдельными пусками РН: выигрыш в массе КА, доставляемого на ГСО, и, соответственно, экономия топлива составляет 1,5 тонны. С учетом того, что стоимость 1 кг груза, доставляемого РН «Протон-М» на ГСО, составляет 15 тыс. долларов [7], финансовый выигрыш только по полезной нагрузке составит 22,5 млн. долларов. Здесь также можно добавить уменьшение затрат на закупку компонентов топлива, а также тот положительный факт, что на ГСО выводится уже готовый КА со значительно увеличенной массой. Конечно, нельзя не учитывать значительные затраты на создание УРКП, реализацию мероприятий по приему, размещению, сборке, проверке и запуску различных грузов, но в процессе длительной эксплуатации эти затраты должны окупиться. Говоря о технической и финансовой стороне вопроса, нельзя, конечно же, забывать и о военно-политических аспектах, которые во многих случаях играют определяющую роль.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для обеспечения лидерства России в ракетно-космической сфере необходимо иметь возможность оперативно доставлять полезную нагрузку любой массы на любую орбиту. Один из перспективных путей решения данной проблемы – это разработка и создание универсальных роботизированных космических платформ (баз) на различных орбитах (планетах). В пользу этого утверждения говорят следующие факты. Универсальность УРКП, заключающаяся в том, что они могут быть использованы и как стартовые площадки для дальних полетов, и для размещения на них космического сегмента систем различного целевого назначения. УРКП можно создавать путем доставки ее составных модулей существующими средствами выведения. Уже имеется опыт создания и эксплуатации подобного рода УРКП – это Между-

народная космическая станция. Поэтапность создания такого рода УРКП позволит обеспечить дальнейшее продвижение в космическое пространство.

Создание и эксплуатация УРКП должны осуществляться с участием космонавтов и космических роботов. Совершенствование опыта работы космонавтов на борту орбитальной станции, а также активное развитие космической робототехники позволяют с уверенностью говорить о возможности реализации такого процесса. Наличие космонавтов и КР дает возможность в случае возникновения нештатных ситуаций осуществить их парирование.

Проведенные предварительные расчеты на примере выведения КА с низкоорбитальной УРКП на ГСО показали высокую эффективность этого способа.

Список используемых источников

1. *Чертюк Б.Е.* Звездные войны? Сотрудничество! // *Российский космос*. – 2009. – № 7. – С. 26–29.
2. *Космическое оружие: дилемма безопасности: монография / под ред. Е.П. Велихова, Р.З. Сагдеева, А.А. Кокошина*. – М.: Мир, 1986. – 182 с.
3. *Прилуцкий О.Ф., Родионов С. Н.* Ученые проводят переоценку космического оружия // *США: экономика, политика, идеология*. – 1988. – № 10 (226). – С. 27–36.
4. *Иванов А.А.* «Морской старт» могут установить возле острова Русский. – URL: <https://ria.ru/20201106/ivanov-1583342773.html> (дата обращения: 14.12.2021).
5. *Ведмеденко И.А.* «Роскосмос» рассекретил документы о полете советского космического аппарата на Луну. – URL: <https://naked-science.ru/article/cosmonautics/roskosmos-rassekretil-dokumenty-o-polete?comment=21311> (дата обращения: 14.12.2021).
6. *Левантовский В.И.* *Механика космического полета в элементарном изложении*. – 3-е изд., доп. и перераб. – М.: Наука, 1980. – 512 с.
7. А сколько стоит что-нибудь отправить в космос? – URL: <https://zen.yandex.ru/media/id/5a049e36168a91684faf9ada/a-skolko-stoit-cto-nibud-otpraviv-v-kosmos-chast-2-5ea4cea64325171a6b4e1ad0?&> (дата обращения: 14.12.2021).

Ю.М. Богук*,

кандидат военных наук, доцент;

А.С. Зуев*;

А.В. Пьянусов**,

кандидат военных наук, доцент

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

**СПВИ ВНГРФ, г. Санкт-Петербург.

ВОЕННО-СПЕЦИАЛЬНЫЕ ИГРЫ, КАК СРЕДСТВО ФОРМИРОВАНИЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ КОМПЕТЕНЦИЙ ВОЕННОГО СПЕЦИАЛИСТА

В статье представлено научно-методическое обоснование роли и места военно-специальной игры (ВСИ) в системе подготовки военного специалиста в военных образовательных организациях высшего образования, ее влияния на формирование и оценку военно-профессиональной компетенции.

Ключевые слова: военно-специальная игра, игровой метод обучения, военно-профессиональная компетенция, военный специалист, военная образовательная организация высшего образования.

Теоретические знания, полученные обучаемыми в ходе чтения лекций, проведения семинаров и других занятий, не сразу становятся активным инструментом для познания явлений и процессов, происходящих в изучаемых объектах или системах. Нужно определенное время, чтобы эта теория стала собственным убеждением обучающихся и нужен определенный опыт для формирования умений и приобретения навыков в использовании этой теории в практике. В настоящее время в вузах России широко используются различные формы и методы активизации учебного процесса. Они не остаются неизменными и со временем пополняются новыми методами. Дело в том, что изменяется мир, повсеместно во все сферы общественной жизни внедряются новые технологии, резко возрастают потоки информации. Поэтому одной из задач вузов является подготовка специалистов, способных к постоянному профессиональному совершенствованию. В связи с этим методика обучения обучающихся должна находиться на современном уровне. Используемые методы должны обеспечивать развитие мыслительной деятельности, привитие навыков самостоятельной работы. Познавательную активность обучающихся следует повышать как во время плановых занятий, так и в процессе самостоятельной подготовки с широким применением различных форм практического обучения. Основными из них являются: практические занятия, учения, военно-специальные игры, практики, групповые упражнения, тактико-строевые и инструктивные занятия и др.

В настоящее время одним из самых перспективных направлений обучения остается более широкое использование современных компьютерных технологий. В арсенале каждого преподавателя, должны находиться мультимедийные средства для демонстрации текстового материала, карт, картин, отрывков из документальных и художественных фильмов, аудиозаписей. Поэтому при подготовке учебно-методических материалов наряду с учебной литературой, напечатанной на бумажном носителе, необходимо использовать электронные издания и материалы, полученные в сети Интернет.

Для активизации познавательной деятельности обучающихся широко используется метод создания проблемных ситуаций: постановка различных поисковых задач и заданий. Это намного оживляет учебный процесс, повышает интерес курсантов к изучению предмета.

Одной из перспективных форм проведения занятий является военно-специальная игра (ВСИ).

ВСИ является сложной формой практического профессионального обучения [1] и представляет собой специально организованную деятельность обучающихся, в результате которой операционные теоретические знания переводятся в деятельностный контекст. Ее отличие от других видов занятий в том, что в ВСИ можно смоделировать реальную оперативно-служебную обстановку.

Перевод в деятельностный контекст достигается путем имитации различных служебно-боевых задач, решение которых обеспечивает формирование у обучающихся компетенций в выполнении функциональных обязанностей в условиях максимально приближенных к реальной обстановке.

Все ВСИ относятся к классу имитационных. В них закладывается совмещение двух моделей: имитационной и игровой. Первая модель – имитация предметного содержания профессии, а вторая модель – действия должностного лица в конкретной обстановке.

Практика показывает, что в современных условиях наибольший интерес представляют кафедральные ВСИ. Их целесообразно планировать и проводить в рамках одной учебной дисциплины. Реже можно проводить и межкафедральные ВСИ, в которых участвуют несколько кафедр.

Особенность кафедральной военно-специальной игры, если сравнивать с прочими форматами обучения, заключается в формировании моделируемой деятельности в качестве организующего звена. Необходимость в том, чтобы получать новые знания появляется в результате замысла проведения военно-специальной игры. Когда проводится ВСИ для каждого обучающегося характерно сопоставление собственных действий в соответствии с определенной должностью, что в результате приводит к выработке индивидуальной линии поведения. Обучающая форма сопровождается реализацией функции воспитания.

Такая ситуация характерна в первую очередь, потому что для коллективного поведения с независимой деятельностью обучающихся в процессе военно-специальной игры характерно абсолютное усвоение как знаний, так и методов к действию. При этом военно-специальная игра предоставляет возможность понять, что ответственность перед товарищами согласно с коллективной деятельностью высока, а также здесь осуществляется формирование осознанности в нравственном поведении в профессиональном коллективе.

Проявление обучающей функции заключается в том, что в военно-специальной игре характерно переходить от организационной к регулятивной познавательной деятельности, реализация которой осуществляется преподавателем в соответствии с прочими видами формата обучения. При этом познавательная деятельность осуществляется в регулятивном формате. Для подобной деятельности характерна абсолютная реализация дидактических факторов активности каждого обучающегося на протяжении всей военно-специальной игры.

Преподаватель выполняет главную задачу, которая заключается в том, что для него должно быть характерно умение формирования дидактических и методических условий, чтобы включать всех обучающихся в деятельность игрового процесса. Познание и развитие протекает с особым игровым форматом по имитации.

По утверждениям экспертов, познавательная деятельность имитируется в формате игры, что подразумевает собой регулирование инструментами познания, когда обучающиеся приобретают и реализуют приобретенные навыки и умения.

Проведенные исследования показывают, что наибольший эффект обучения достигается тогда, когда моделируемая деятельность в ходе военно-специальной игры наиболее близка по структуре служебно-боевой деятельности.

При этом в хорошо подготовленной организованной военно-специальной игре обучающиеся учатся логически мыслить и рассуждать, обосновывать принятые решения, что является основой формирования творческого мышления. Многие авторы [2–5], посвятившие себя вопросу игрового обучения, отмечают высокую эффективность данных методов на формирование профессиональных компетенций у обучающихся.

Для достижения этих целей преподавателю важно в ходе образовательного процесса грамотно имитировать организационные, технические, военные, правовые, психолого-педагогические и другие проблемы, а затем в ходе военно-специальной игры умело моделировать деятельность специалистов для успешного решения каждой из поставленных учебных проблем.

К сожалению, в некоторых вузах, имеет место недооценка роли ВСИ как практической формы обучения, хотя педагогическая практика показывает, что в образовательном процессе игра, как форма обучения, может способствовать существенному развитию интеллектуальных способностей обучающегося, а также умению рационально действовать в условиях реальной жизни.

В ходе проведения военно-специальной игры у обучающихся развивается углубленное осознание трудных вопросов, а при решении таких проблем обучающиеся приобретают особые навыки и умения. При этом, для военно-специальной игры характерна профессиональная специфическая коммуникация каждого участника, для которого служебная боевая деятельность находится в непосредственной близости.

Имитационные ВСИ можно разделить на следующие виды: деловой и операционный.

Деловая игра призвана имитировать «реальные» служебно-боевые задачи и на практике позволяет решать их непосредственно в подразделениях. Для нее характерна достаточно качественная подготовка и реализация учебной деятельности. Деловая игра проводится на протяжении достаточно длительного времени, в ходе чего осуществляется выработка индивидуального образа коммуникации и поведения руководства в соответствии с решением задач в коллективе.

В качестве воспитывающей и развивающей функции подразумевается формирование общечеловеческих качеств. При этом деловая игра формирует профессиональные особенности, которые предназначены для решения задач в процессе коммуникации командующего с подопечным. Обучающая функция деловой игры способствует практическому применению способов реализации занятий в ходе самостоятельной работы.

Для *операционной игры* характерен тот факт, что здесь присутствуют игровые поля. Операционная игра выступает в качестве инструмента для того, чтобы заучивать информацию, которая может выступать в качестве алгоритма конкретных действий, чтобы решить конкретную задачу.

Для игрового способа характерны соответствующие преимущества, которые заключаются в том, что он сопровождается усвоением предметной сферы в качестве операций и определенных действий в соответствии с алгоритмом изучения положений теории.

В качестве разновидности в ходе ВСИ может применяться метод инсценировки, как правило, для решения частных игровых задач. Суть его заключается в том, чтобы разыграть какую-либо ситуацию, характерную для поведения военнослужащих в определенной обстановке. Здесь важно, чтобы каждый обучаемый мог вжиться в образ определенного должностного лица, понять его обязанности, профессиональную психологию, оценить обстановку и выработать в соответствии с этим правильную линию поведения. Основная цель этого метода – научить умело ориентироваться в различных условиях оперативно-служебной обстановки, давать объективную оценку своим действиям, учитывать возможности своего подразделения (части) и т. д.

Для метода инсценировки главное тщательно разработать сценарий, где требуется описать конкретные ситуации, функциональные обязанности участников и решаемые ими задачи. При этом важно осуществить имитацию предметного содержания занимаемой должности, задать определенную систему ролей, целей и мотивов игровой учебной деятельности.

Применение игр в образовательном процессе безусловно важный, но не единственный путь совершенствования подготовки обучающихся. Практика показывает, что необходимо гибко использовать все существующие формы и методы обучения в разумном соотношении.

При подготовке кафедральных ВСИ у преподавателей возникают трудности, связанные с содержанием и построением игры. Поэтому с учетом имеющегося опыта можно выработать методические рекомендации. Приведем некоторые из них.

При подготовке ВСИ преподаватель должен учитывать:

- реальность замысла, его прикладную направленность и практичность;
- содержательность и наглядность имитационной и игровой модели ВСИ;
- автономность отдельных фрагментов ВСИ;
- возможность дальнейшего совершенствования.

При проведении ВСИ преподаватель должен:

- вовлекать участников в активное решение поставленных задач (проблем);
- добиваться полного включения курсантов и слушателей в игровые ситуации;
- поощрять и развивать состязательность между игровыми группами и отдельными участниками;
- добиваться равномерной нагрузки на каждого участника в ходе игровой деятельности;
- следить за работой участников с помощью экспертов (помощников) и фиксировать их действия.

По окончании ВСИ важно сделать детальный разбор хода игры, действий играющих участников и объективно оценить участие каждого в игре.

Методика разработки ВСИ включает:

- определение учебно-воспитательных целей (формирование навыков и умений; воспитание профессиональных черт и деловых качеств);
- определение исходных данных;
- разработку замысла (при этом стоит отметить достаточно высокую роль определения способа, как именно будет проводиться игра, а также планирование круга целей и задач, решение которых необходимо сформировать и реализовать в соответствии с игровым процессом);
- составление плана разработки (построение имитационной и игровой модели);
- сбор материалов (необходимых для решения поставленных целей и воплощения замысла игры);
- разработку методических указаний обучаемым;
- разработку инструкций участникам (определение порядка действий играющих на каждом этапе ВСИ);
- постановку конкретных задач играющим (что на каждом этапе знать, что исполнить, какие материалы и документы разработать, к чему быть готовым, что подготовить к докладу).
- разработку критериев оценки.

Подготовка и проведение ВСИ сложный и трудоемкий процесс, требующий больших усилий и кропотливого труда каждого преподавателя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с практическими исследованиями, применение военно-специальных игр целесообразно тогда, когда для отрабатываемых тем предусмотрена учебная теория и практика. Для военно-специальной игры характерно абсолютное решение ключевой дидактической задачи, которое выступает в качестве отработки практических проблем, требующих тесной коммуникации специалиста и профессионального подразделения при выполнении и реализации служебных боевых задач.

В ходе ВСИ у обучающихся развивается творческое мышление, формируются профессиональные индивидуальные особенности, помогающие принимать рациональные и взвешенные решения, думать о последствиях и отвечать за свои действия, принципиально самостоятельно выполнять трудные задачи [6].

Применение военно-специальных игр в образовательном процессе, наряду с другими формами и методами обучения, позволит значительно повысить уровень подготовки специалистов в вузах МО РФ.

Список используемых источников

1. *Образцов П.И., Косухин В.М.* Дидактика высшей военной школы: учеб. пособие. – Орел, Академия спецсвязи России, 2004. – 317 с.
2. *Айламазьян А.М.* Актуальные методы воспитания и обучения: Деловая игра: учеб.-метод. пособие для студентов психол. фак. гос. ун-тов. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1989. – 56 с.
3. *Ефимова Т.О.* Игра как метод, форма и средство обучения // Проблемы взаимодействия национальных культур в региональной многоуровневой системе музыкального образования: сб. материалов седьмой Южно-Российской научно-практ. конф. – Краснодар, 2007. – С. 63–65.
4. *Ефимова Т.О.* Формирование профессиональной компетентности, как обязательного условия профессиональной самореализации студентов средствами игровых технологий // Наука, культура, образование глазами молодых ученых. Аспирантские чтения: сб. материалов конф. – Краснодар, 2008. – Вып. 3. – С. 27–30.
5. *Халматова С.Н.* Педагогические основы внедрения инновационных игр в учебный процесс: дисс. ... акед. степени магистра. – Навои, 2011. – 103 с.
6. *Ванягин В.Е.* Практические рекомендации преподавателям и командирам курсантских подразделений по реализации методики оценивания уровня сформированности военно-профессиональных компетенций будущих офицеров при изучении тактических (тактико-специальных) дисциплин // Боевое применение ракетных войск и артиллерии в операции и бою: тематический сб. МВАА. – СПб.: МВАА, 2014. – № 47. – С. 87–95.

К.О. Гнидко,
доктор технических наук, доцент;
С.А. Макаров,
кандидат военных наук;
Д.С. Нагорный

ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ О ВВЕДЕНИИ ОСОБЫХ РЕЖИМОВ В ВУЗАХ МИНИСТЕРСТВА ОБОРОНЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

В статье представлена аналитическая модель поддержки принятия решения о необходимости введения самоизоляции обучающихся вузов МО РФ в условиях пандемии, а также результаты экспериментального исследования по практическому применению данной модели и решению задачи выявления нулевого пациента и определения даты первичного инфицирования подразделения. Полученные результаты показали практическую полезность разработанного подхода, а также алгоритмов и программных компонент для выявления структуры социальных связей в учебном коллективе, для поддержки принятия решений, направленных на снижение рисков санитарных потерь личного состава и поддержания требуемого качества подготовки специалистов в сложных эпидемиологических условиях.

Ключевые слова: моделирование, поддержка принятия решения, объективный контроль, управление рисками, эпидемиология, самоизоляция, пандемия.

ВВЕДЕНИЕ

Под моделью поддержки принятия решения в рамках данной статьи понимается система следующих взаимосвязанных элементов: проблемная ситуация и ее основные факторы, постановка задачи поддержки принятия решения, исходные данные, критерий принятия решения, средства имитационного моделирования, интерпретация полученных результатов.

Наиболее значимым фактором, оказавшим влияние на качество работы высших учебных заведений Министерства обороны Российской Федерации (вузов МО РФ) по организации подготовки специалистов в 2020 году стала пандемия вируса COVID-19. При этом отмечалось следующее противоречие в практике: стремительное распространение инфекции требовало принятия решительных мер по снижению заболеваемости обучающихся, однако действующие нормативно-правовые документы носили общий рекомендательный характер и не предоставляли формальных критериев для принятия управленческих решений.

Для разрешения сложившейся проблемной ситуации в марте 2020 года руководством ВКА имени А.Ф. Можайского была поставлена задача научного обоснования и поддержки принятия решения о размещении обучающихся, способном сократить санитарные потери. Рассматривались два альтернативных варианта: первый вариант – личный состав самоизолируется на съемных квартирах; второй вариант – курсанты размещаются курсами и изолируются в местах проживания на территории академии.

Таким образом, главной целью настоящего исследования являлась разработка аналитико-имитационной модели поддержки принятия решения о необходимости введения самоизоляции обучающихся на основе современных методов интеллектуальной обработки данных и последних достижений в области эпидемиологии [1].

Объектом настоящего исследования выступает образовательная организация высшего профессионального образования Министерства обороны в условиях сложной эпидемиологической обстановки. Предметом исследования являются методы и средства поддержки принятия решений о мерах по сокращению санитарных потерь личного состава в условиях пандемии.

Исходными данными для разрабатываемой модели являются сведения о структуре социальных связей (социальных графах) курсантских подразделений. Современные методы исследования структуры социальных графов базируются, как правило, на различных вариантах опросников [2; 3], анализе данных социальных сетей [4–6] или обработке интернет-трафика мобильных устройств [7; 8]. Сходным по содержанию является опыт китайских исследователей, применявших для выявления социальных связей особые RFID метки [9]. Методы, основанные на применении опросников, равно как и анализ социальных сетей, обладая такими преимуществами как относительная простота реализации и простая интерпретируемость результатов, обладают, тем не менее, и недостатками. Профили пользователей социальных сетей не всегда заполнены достоверной информацией, а сам факт проведения исследования путем проведения опроса или закрепления за человеком индивидуального устройства сбора данных может привести к сознательному или спонтанному изменению поведения и искажению результатов.

Результаты, полученные с применением изложенных методов, таким образом, могут приводить к ошибочным выводам при проверке гипотез, а также к ухудшению качества моделей, построенных на основе имеющихся данных.

Разработанный авторами ранее метод [10], в отличие от известных аналогов, не требует проведения опросов и анкетирования испытуемых, позволяет проводить исследование в том случае, когда субъекты коммуникации не имеют аккаунтов в социальных сетях, либо аккаунты заполнены недостоверной персональной информацией. Роль индивидуальных меток выполняют уникальные биометрические особенности каждого индивидуального человека. В качестве источника исходных данных для анализа социальной структуры коллектива используются данные систем объективного контроля, применяемых в организации. В частности, в ходе проведенного эксперимента разработанная модель апробирована с использованием данных биометрической системы контроля управления доступом, заказа питания, которая регистрирует факт и время прибытия обучающихся к стойке раздачи пищи в столовой ВКА имени А.Ф. Можайского.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Сбор и подготовка исходных данных для построения модели и проведения экспериментального исследования для оценки ее адекватности включали в себя четыре основных этапа:

- 1) получение данных системы контроля управления доступом, заказа питания в виде файлов формата *csv*;
- 2) предварительная обработка данных (обработка аномалий и выбросов, формирование биграмм – пар значений, соответствующих уникальным идентификаторам военнослужащих, следующих в очереди непосредственно друг за другом);
- 3) формирование дискретных вариационных рядов биграмм и сохранение полученных данных в формате описания графов *GML (Graph Modelling Language)* в виде неориентированного взвешенного графа $G = (V, E)$; при этом множеству вершин графа $\{V\}$ соответствуют отдельные военнослужащие, множеству ребер $\{E\}$ – связи между ними, а веса ребер показывают количество повторов зафиксированного факта соседства в очереди двух человек за период наблюдений;
- 4) визуализация и первичный анализ графа социальных связей в подразделении; на данном этапе путем установления порогового значения τ для весов ребер графа G выявляются статистически достоверные социальные связи, устойчивые малые группы, неформальные лидеры и «изгои» с аномально малым числом социальных связей.

КРИТЕРИЙ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ О НЕОБХОДИМОСТИ ВВЕДЕНИЯ САМОИЗОЛЯЦИИ

Прогнозирование сценариев распространения инфекции в такой системе как военное образовательное учреждение, являющейся большим графом, – это проблема, решение которой требует обращения ко многим областям знания. На характер распространения инфекционного агента по графу может оказывать влияние как топология графа, так и совокупность свойств самой инфекции, таких как «живучесть», «заразность», способность к самовоспроизводству и так далее. Известны исследования в области эпидемиологии [11–13], главным результатом которых является следующая выявленная закономерность: распространение эпидемии в биологической системе экспоненциально затухает, если выполняется неравенство

$$\frac{\beta}{\sigma} < \frac{1}{\lambda}, \quad (1)$$

где β – коэффициент заражения (количество заболевших на 1000 населения);
 σ – коэффициент излечения (отношение количества выздоровевших к числу заболевших);
 λ – максимальное по модулю собственное число матрицы инцидентий социального графа (интегральный показатель связности социального графа).

Оценки параметров β и σ могут быть получены на основе статистических данных. Так, например, если общее число зараженных в Санкт-Петербурге по состоянию на 26.04.2020 г. составляло 3000 человек, число выздоровевших – 490, а общее число жителей Санкт-Петербурга принять равным 4,8 млн. человек, то значение коэффициента β равно 0,625 ($\beta = \frac{3 \cdot 10^3}{4,8 \cdot 10^6} \times 1000$), коэффициента σ , соответственно, 0,16 ($\sigma = \frac{4,9 \cdot 10^2}{3 \cdot 10^3}$). Если принять в качестве допущения, что на свойства инфекции непосредственно повлиять невозможно, то отношение $\frac{\beta}{\sigma} = \text{const} \approx 3,91$. Проблема поддержки принятия решения по выбору противэпидемиологических мер в условиях пандемии сводится к поиску ответа на вопрос: каким образом, изменяя топологию графа социальных связей в подразделении, можно воздействовать на распространение инфекции в образовательном учреждении.

На основании неравенства (1) для предотвращения неконтролируемого распространения инфекции может быть предложен подход, основанный на снижении собственного числа матрицы инцидентий графа за счет удаления ребер графа.

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТОВ РАЗМЕЩЕНИЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ В УСЛОВИЯХ ПАНДЕМИИ

Рассмотрим в качестве примера два графа, в каждом из которых 100 вершин. Первый из них является усредненной моделью социальной структуры подразделения, локализованного на закрытой территории внутри академии (множественные контакты друг с другом, редкие контакты с окружающим миром) (рис. 1), а второй представляет вариант самоизоляции обучающихся в городе (крайне редкие контакты между собой, повышенная вероятность контактов с внешним миром) (рис. 2). Кластеры вершин на рис. 1 соответствуют учебным группам, а номер вершины – порядковому номеру обучающегося в группе.

Эксперимент, проведенный на функционально ориентированном кроссплатформенном языке программирования Python с применением пакета низкоуровневой линейной алгебры LAPACK, показал, что максимальное по модулю собственное число матрицы инцидентий графа, изображенного на рис. 2, $\lambda = 2,88$. Для полученного значения λ условие затухания эпидемии (1) не выполняется, поскольку $\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{2,88} = 0,35$ и, соответственно $3,91 > 0,35$. Для

второго графа $\lambda = 10^{-6}$, что приводит к самопроизвольному экспоненциальному сокращению распространения инфекции ($3,91 \ll 10^6$), что однозначно говорит о практической невозможности неконтролируемого распространения эпидемии между членами учебного коллектива в условиях изолированности друг от друга.

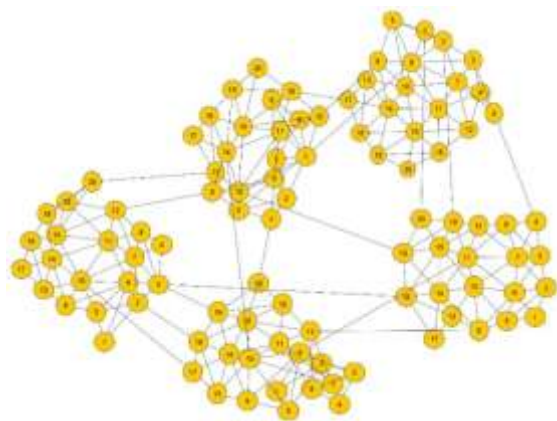


Рис. 1. Граф связей коллектива, изолированного в части

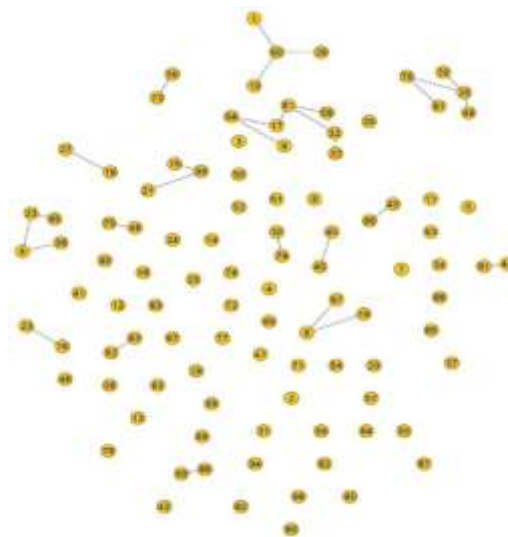


Рис. 2. Граф связей обучающихся, размещенных в городе в режиме самоизоляции

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные в ходе моделирования данные позволяют обоснованно утверждать, что главной угрозой безопасности личного состава, компактно размещенного в части, является возможность заноса инфекции извне. В этом случае вероятность заражения большинства членов коллектива становится крайне высокой, воздействовать на процесс передачи инфекции практически невозможно. В случае размещения в городе главной опасностью является нарушение личным составом режима самоизоляции и повышенная вероятность индивидуальных заражений. Однако возможность массового заражения практически исключена. Такие результаты полностью согласуются с результатами других авторов [14–16].

Предложенная модель также применима для решения задачи выявления первого заболевшего, так называемого «нулевого» пациента и установления источника проникновения инфекции в воинское подразделение с целью минимизации риска снижения качества подготовки военных специалистов из-за санитарных потерь в будущем.

ПРИМЕР ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ РАЗРАБОТАННОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ НУЛЕВОГО ПАЦИЕНТА И ДАТЫ ПЕРВОНАЧАЛЬНОГО ИНФИЦИРОВАНИЯ ЛИЧНОГО СОСТАВА ПОДРАЗДЕЛЕНИЯ

При рассмотрении проблематики поиска так называемого нулевого пациента, интерес представляет круг общения заразившихся инфекцией, а также изменение во времени связанных с предметной областью параметров. Анализ динамики контактов сопряжен с оценкой связности графа контактов личного состава подразделения по дням (в течение рассматриваемого периода). В настоящей работе рассмотрен пример практического применения разработанного подхода для выявления нулевого пациента и даты первоначального инфицирования личного состава подразделения с целью снижения подобных рисков в дальнейшем.

На рис. 3 фрагментарно представлены результаты моделирования контактов обучающихся 62-го курса ВКА имени А.Ф. Можайского, на котором был отмечен всплеск заболеваемости. В подписях к диаграммам социальных контактов символом λ обозначено максимальное по модулю собственное число матрицы инцидентности графа, характеризующее его связность.

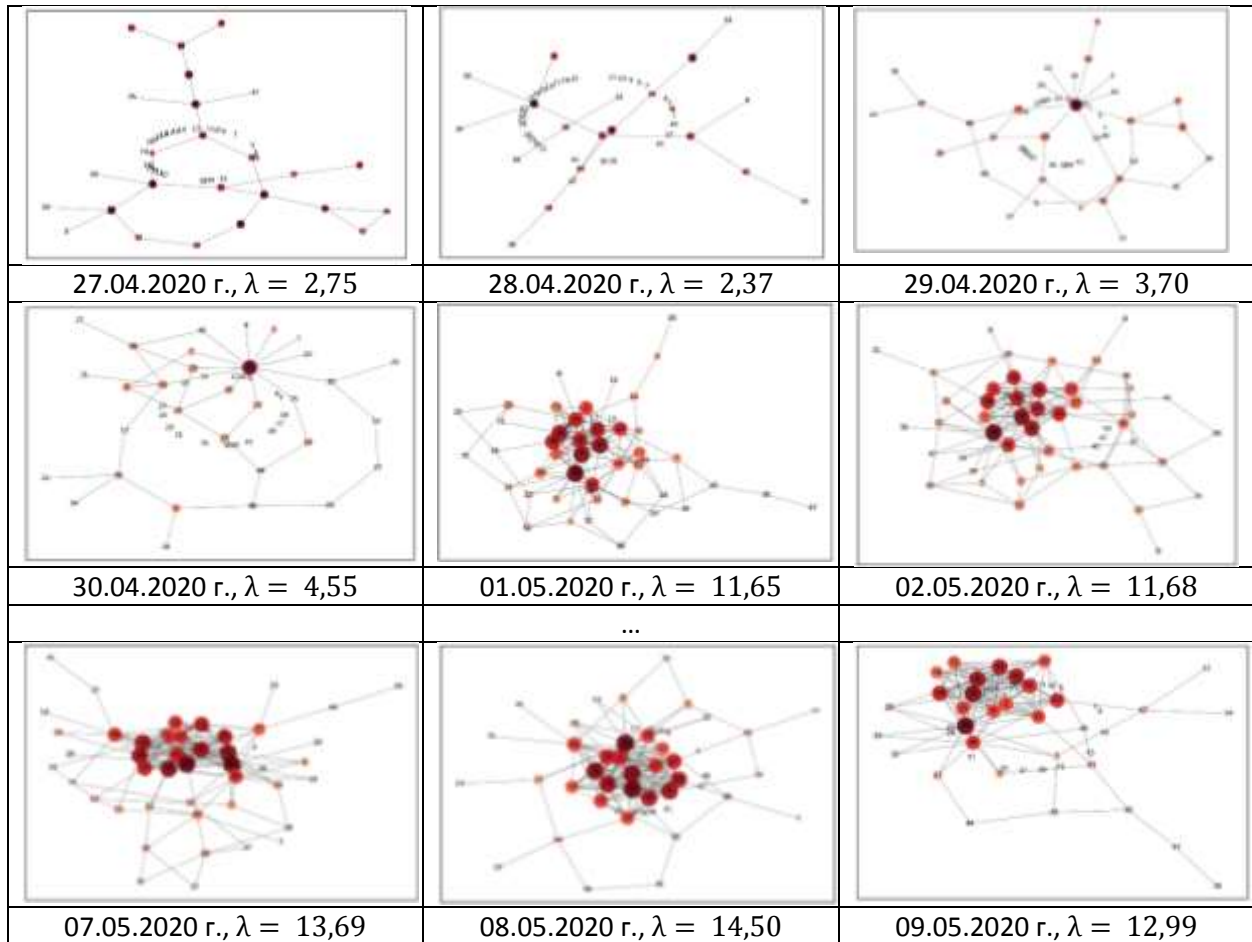


Рис. 3. Графы связей личного состава 62-го курса по дням

Анализ полученных данных позволяет констатировать, что пиковое значение $\lambda = 14,50$ достигнуто 8 мая 2020 года. Динамика изменения максимального по модулю собственного числа матриц инцидентности, соответствующих рассматриваемым графам представлена на рис. 4.

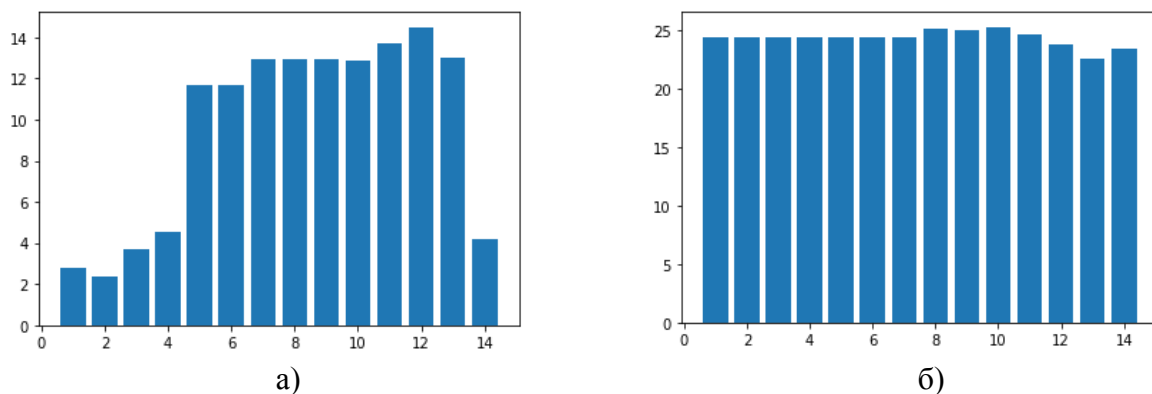


Рис. 4. Изменение максимального по модулю собственного числа матрицы связности по дням (по оси x – порядковый номер дня, начиная с 27 апреля):
а – 62-й курс; б – 63-й курс

Аналогичная задача, решаемая для 63-го курса показала, что динамика контактов и оценка связности соответствующего графа не имеет унимодального характера (рис. 4,б) и при этом отличается существенно большими абсолютными значениями параметра $\lambda_3 \in [22,64; 25,32]$ против $\lambda_2 \in [2,37; 14,50]$ для 62-го курса. Визуальное подтверждение этому представлено на рис. 5.

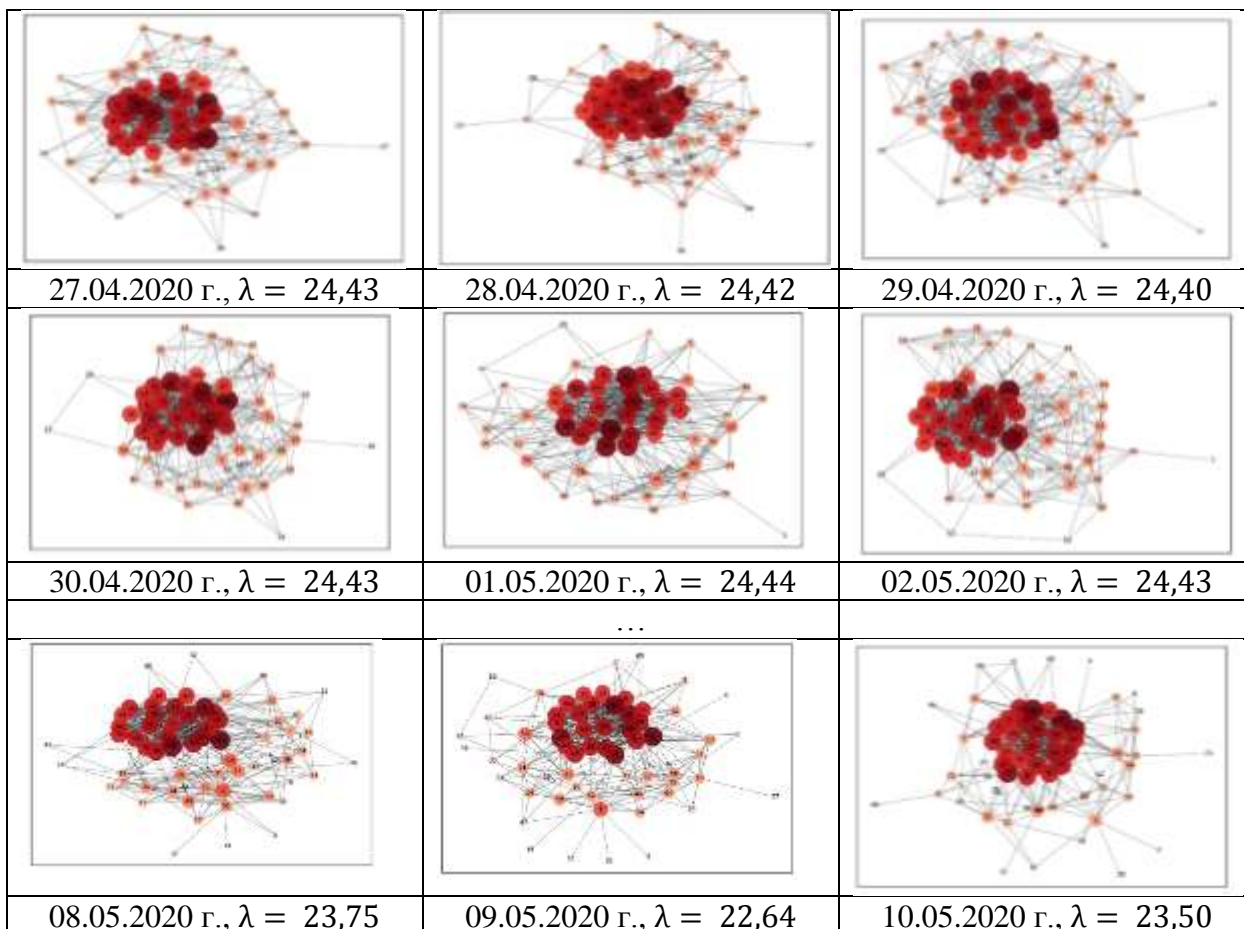


Рис. 5. Графы связей личного состава 63-го курса по дням

Представляется очевидным, что количество межличностных контактов на 63-м курсе выше, что проявилось в более высокой динамике роста количества зараженных, чем на 62-м курсе (рис. 6).

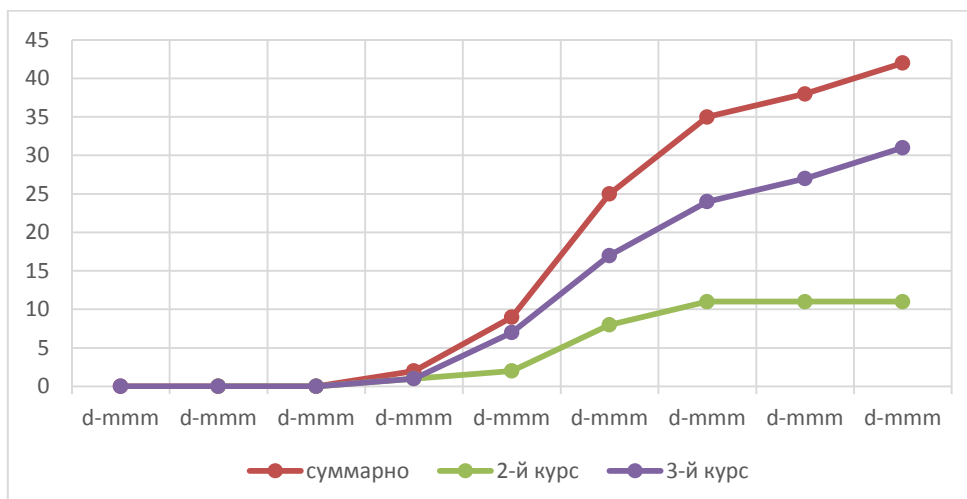


Рис. 6. Динамика изменения общего количества зараженных в подразделении

Приведенные кумулятивные данные складываются из значений прироста заболевших, учитываемых по дням (рис. 7).

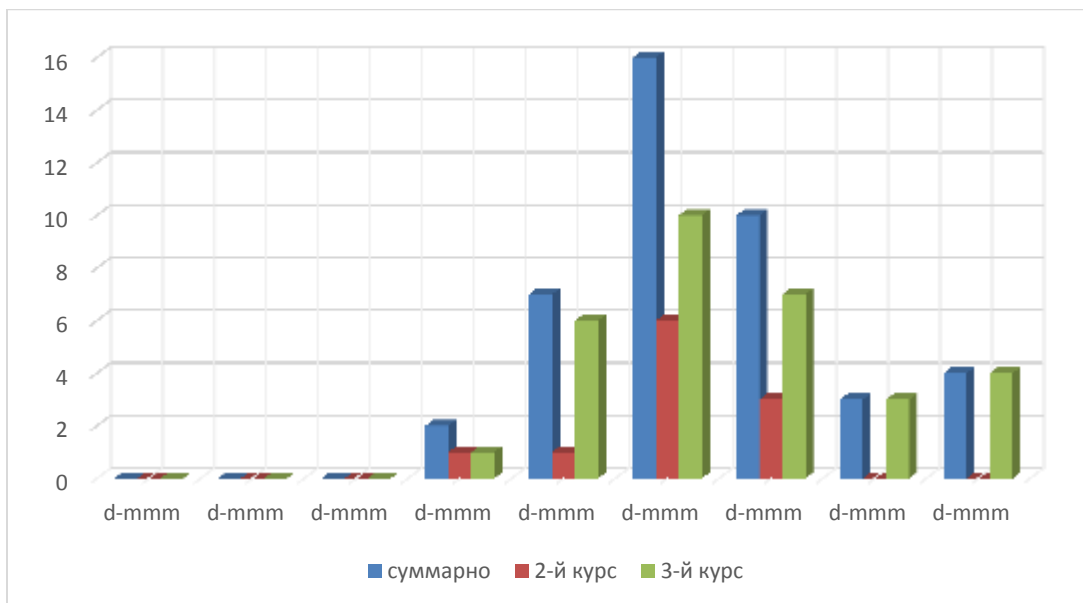


Рис. 7. Прирост заболевших в подразделении

Пиковое значение прироста заболевших пришлось на 10.05.2020 г. Кроме того, значения медиан трех рядов данных («суммарно», «2-й курс», и «3-й курс») равны $Me_1 = 31$, $Me_2 = 11$, $Me_3 = 20$ и соответствуют дате 10 мая. Необходимо учесть, что продолжительность периода с момента заражения COVID-19 до появления симптомов обычно составляет около 5-6 дней (рис. 8), хотя может варьироваться в пределах от 1 до 14 дней.

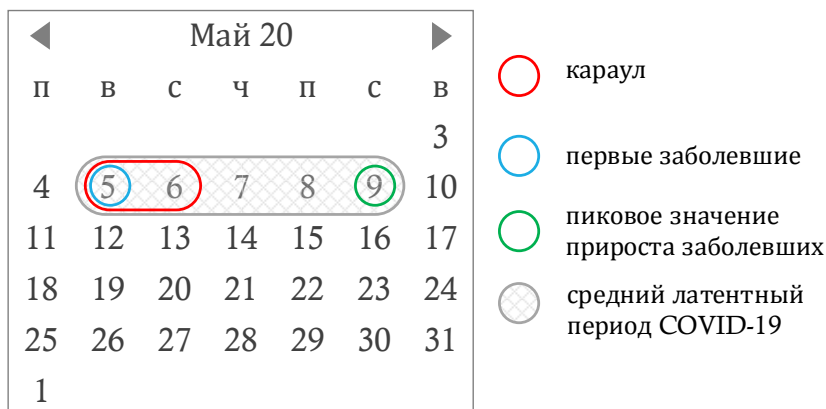


Рис. 8. Основные даты и временные интервалы, соответствующие анализируемому массиву данных

Таким образом, полученные в ходе исследования данные позволяют сделать вывод о том, что 5-6 мая (предположительно, во время нахождения в гарнизонном карауле) произошел контакт личного состава подразделения с источником заражения, приведший к скачкообразному увеличению госпитализированных на 2-м и 3-м курсах факультета 10-11 мая. Изложенная методика применима к решению подобных аналогичных задач.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование продемонстрировало практическую применимость разработанной модели поддержки принятия решения, а также алгоритмов и программных компонент для скрытого выявления структуры социальных связей в учебном коллективе на основе анализа данных биометрических и иных систем объективного контроля. Таким образом задачи исследования могут считаться выполненными, а цель – достигнутой.

Потребителями результатов исследования могут стать руководители и кадровые работники образовательных учреждений, сотрудники, службы безопасности крупных организаций, лица, принимающие решения о необходимости введения ограничений в условиях эпидемического или пандемического распространения инфекционных заболеваний.

Представленная в работе модель, а также разработанные в ходе исследования программные компоненты, реализующие алгоритмы построения графа социальных связей на основе скрытого сбора данных объективного контроля, могут быть полезны при решении задач в смежных областях знания, например, для решения задач моделирования распространения информации и обеспечения информационной безопасности [1], поиска так называемого нулевого пациента и прогнозирования параметров распространения инфекции в больших коллективах в условиях санитарно-эпидемиологических ограничений [17], а применение различных методов машинного обучения и искусственного интеллекта способно повысить результативность выявления новых закономерностей.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-29-22064).

Список используемых источников

1. Гнидко К.О., Жолус Р.Б. Метод управления топологией социальной сети с целью предотвращения неконтролируемого эпидемиологического распространения информации между узлами // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2016. – № 9(59). – С. 729–734.
2. Trust And The Strength Of Ties In Online Social Networks: An Exploratory Field Experiment / R. Barua [et al] // MIS Q. – 2017. – Vol. 41, № 1. – P. 115–130.
3. What makes you a ‘hero’ for nature? Socio-psychological profiling of leaders committed to nature and biodiversity protection across seven EU countries / M. Scopelliti [et al] // Journal of environmental planning and management. – 2018. – Vol. 61, № 5–6. – P. 970–993.
4. SENS: Network analytics to combine social and cognitive perspectives of collaborative learning / D. Gašević [et al] // Computers in Human Behavior. – 2019. – Vol. 92. – P. 562–577.
5. Influence analysis in social networks: A survey / S. Peng [et al] // Journal of Network and Computer Applications. – 2018. – Vol. 106. – P. 17–32.
6. Deepdirect: Learning directions of social ties with edge-based network embedding / C. Wang [et al] // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. – 2018. – Vol. 31, № 12. – P. 2277–2291.
7. Nguyen C.-B., Yoon S., Kim J. Discovering Social Community Structures Based on Human Mobility Traces // Mobile Information Systems. – 2017. – Vol. 2017. – P. 1–17.
8. Yabe T., Ukkusuri S.V., Rao P.S.C. Mobile phone data reveals the importance of pre-disaster inter-city social ties for recovery after hurricane maria // Applied Network Science. – 2019. – Vol. 4, № 1. – P. 1–18.
9. Inferring and analysis of social networks using RFID check-in data in China / T. Liu [et al] // PloS one. – 2017. – Vol. 12, № 6. – P. e0178492.
10. Гнидко К.О., Абросимов К.М., Макаров С.А. Скрытое выявление структуры социальных связей в учебном коллективе на основе анализа данных средств объективного контроля // Труды ВКА имени А.Ф. Можайского. – 2021. – Вып. 667. – С. 151–155.

11. *Hethcote H.W.* The Mathematics of Infectious Diseases // *SIAM Review*. – 2000. – Vol. 42, № 4. – P. 599–653.
12. Epidemic spreading in real networks: An eigenvalue viewpoint / Wang Y. [et al] // *SRDS*, 2003. – URL: <https://faculty.mcombs.utexas.edu/deepayan.chakrabarti/mywww/papers/srds03.pdf> (дата обращения: 09.08.2021 г.).
13. *Ganesh A., Massoulié L., Towsley D.* The effect of network topology on the spread of epidemics // *IEEE*. – 2005. – P. 1455–1466.
14. Lessons from operations management to combat the COVID-19 pandemic / J.R. Patrinley [et al] // *Journal of Medical Systems*. – 2020. – Vol. 44, № 7. – P. 1–2.
15. *Suprawittaya P., Yiemphat P., Yasri P.* Effects of social distancing, self-quarantine and self-isolation during the COVID-19 pandemic on people's well-being, and how to cope with it // *International Journal of science and healthcare research*. – 2020. – Vol. 5, № 2. – P. 12–20.
16. *Topirceanu A., Udrescu M., Marculescu R.* Centralized and decentralized isolation strategies and their impact on the COVID-19 pandemic dynamics // *arXiv preprint arXiv:2004.04222*. 2020. – URL: <https://arxiv.org/pdf/2004.04222.pdf> (дата обращения: 22.12.2021 г.).
17. *Newman M.E.J.* The spread of epidemic disease on networks // *Physical Review E*. – 2002. – Vol. 66, № 1. – P. 612–615.

А.С. Данилюк*,
кандидат военных наук, доцент;

В.М. Медведев**,
кандидат технических наук, профессор

*Военный университет радиоэлектроники, г. Череповец.

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

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПЕТЕНЦИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ СБОРА И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ТЕХНИЧЕСКИМИ СРЕДСТВАМИ

Анализируется опыт обеспечения подготовки специалистов в области сбора и обработки информации техническими средствами к профессиональной научно-исследовательской деятельности на примере специальности 11.05.02 «Специальные радиотехнические системы».

Ключевые слова: высшее образование, исследование, компетентностный подход, научно-исследовательская работа, основная образовательная программа, федеральный государственный образовательный стандарт.

ВВЕДЕНИЕ

Изменения организации высшего образования (ВО), обусловленные переходом обучения в России на федеральные государственные образовательные стандарты (ФГОС) третьего поколения и, разработка соответствующих им основных образовательных программ (ООП) по направлениям подготовки специалистов, магистров и адъюнктов в высших военно-учебных заведениях (ввузах) Министерства обороны Российской Федерации, определяют требования к оцениванию результатов учебной деятельности на основе компетентностного подхода. Статья посвящена рассмотрению особенностей решения вузами задачи формирования у обучаемых комплекса компетенций, включающего: общекультурные компетенции (ОК); общепрофессиональные компетенции (ОПК); профессиональные компетенции (ПК); профессионально-специализированные компетенции (ПСК) с требуемым уровнем компетентности, в том числе по вопросам организации научно-исследовательской работы (НИР) для различных этапов подготовки (специалистов, магистров, адъюнктов) – выпускников вузов различных уровней ВО, согласно Федеральному закону Российской Федерации от 29.12.2012 г. № 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации» и приказу Министерства обороны России «О мерах по реализации отдельных положений статьи 81 Федерального закона от 29 декабря 2012 г. № 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации» от 15 сентября 2014 г. № 670) [1–3], что обеспечивает достижение требуемых результатов образования.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ОЦЕНИВАНИЯ КАЧЕСТВА ПОДГОТОВКИ ВЫПУСКНИКОВ ВУЗОВ В ТЕРМИНАХ КОМПЕТЕНТНОСТНОГО ПОДХОДА

Под результатами образования понимают ожидаемые и измеряемые конкретные достижения обучающихся и выпускников, выраженные на языке знаний, умений, навыков, способностей, компетенций, раскрывающие то, что должен быть в состоянии делать обучающийся/выпускник по завершении освоения всей или части образовательной программы. При этом, основными показателями оценки качества результата обучения выступают уровни компетентности и компетенции. Компетенции – это динамический набор знаний, умений, навыков, моделей поведения и личностных качеств, которые позволяют выпускнику

успешно профессионально реализовываться в широком спектре обязанностей военной службы. Формирование компетенций осуществляется в процессе решения практических, ситуационных и исследовательских задач, направленных на интеграцию полученного ранее опыта и приобретение нового в процессе совместной деятельности с преподавателем (руководителем, консультантом) или под его руководством [3, 4, 6, 7].

Отличительной особенностью компетентностно-ориентированной рабочей программы дисциплины (модуля), является то, что в ней формулируются ожидаемые результаты освоения дисциплины (модуля) в форме соответствующих уровней знаний, умений, навыков, способствующих формированию у обучающихся компетенций того, что они смогут делать из сферы будущей профессиональной деятельности после завершения освоения данной дисциплины или ООП в целом. Заявляемые результаты обучения являются основой для аргументированного и обоснованного отбора компетентностно-ориентированного содержания дисциплины (модуля), форм и методов преподавания, средств и процессов оценивания результатов. Соответствие заявленных результатов и реальных достижений обучающихся является с помощью оценочных средств аттестации (на проводимых контрольных мероприятиях, в том числе и на защитах результатов), а поддержание в актуальном состоянии их фонда в условиях динамично изменяющихся квалификационных требований к выпускникам как никогда ранее актуально. Приобретение требуемых компетенций обучающегося по каждой дисциплине основывается на правильном формировании содержания дисциплины (модуля), выборе адекватных видов занятий (активных, интерактивных форм), технологий преподавания, форм организации самостоятельной работы обучающихся, средств и методов оценивания результатов.

ОСОБЕННОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ ПОДГОТОВКИ ВЫПУСКНИКОВ

Современный этап подготовки выпускников вузов на уровне специалитета, магистратуры и подготовки научных кадров высшей квалификации (в адъюнктуре) в военных образовательных учреждениях Министерства обороны России имеет ряд отличительных особенностей и характеризуется объективными сложностями и противоречивыми тенденциями текущего периода. В первую очередь это связано с образовательной реформой, определившей подготовку выпускников на уровне специалитета в рамках ФГОС, соответствующей компетентностному подходу организации образовательного процесса, а также, определившей адъюнктуру как завершающий уровень высшего профессионального образования, что в свою очередь привело к перераспределению временного ресурса, направленного на освоение учебных программ и подготовку выпускником адъюнктуры квалификационной работы, и собственно на проведение диссертационного исследования и защиту диссертации [2–4].

Результаты анализа итогов аттестаций и отзывов на выпускников вузов различных сфер деятельности показывают, что ниже по уровню, как правило, оцениваются прикладные (практические) навыки (в том числе навыки проведения НИР) при достаточно высоком уровне остаточных теоретических знаний [3, 5, 8]. Такое состояние практической подготовленности выпускников вузов требует участия сотрудников военно-специальных кафедр в решении ряда задач, обеспечивающих формирование следующих компетенций (на примере специальности (по укрупненной группе специальностей 11.00.00) «Электроника, радиотехника и системы связи»; по специальности 11.05.02 «Специальные радиотехнические системы»; по специализации «Радиотехнические системы и комплексы сбора и обработки информации»):

а) общекультурных:

- способность понимать социальную значимость своей профессии, цели, обладать высокой мотивацией к выполнению профессиональной деятельности, защите интересов личности, общества и государства;

- способность логически верно, аргументированно и ясно строить устную и письменную речь на русском языке, готовить и редактировать тексты профессионального назначения, публично представлять собственные и известные научные результаты, вести дискуссии;

- способность к письменной и устной деловой коммуникации, к чтению и переводу текстов по профессиональной тематике на одном из иностранных языков;

- способность к логическому мышлению, обобщению, анализу, критическому осмыслению, систематизации, прогнозированию, постановке исследовательских задач и выбору путей их достижения;

- способность самостоятельно применять методы и средства познания, обучения и самоконтроля для приобретения новых знаний и умений, в том числе в новых областях, непосредственно не связанных с основной сферой деятельности, развивать социальные и профессиональные компетенции, изменять вид и характер своей профессиональной деятельности;

б) общепрофессиональных:

- способность использовать в профессиональной деятельности основные законы естественнонаучных дисциплин, применять методы математического анализа и моделирования, теоретических и экспериментальных исследований, приобретать новые математические и естественнонаучные знания, используя современные образовательные и информационные технологии;

- способность использовать языки и системы программирования, программные средства общего назначения, инструментальные средства компьютерного моделирования для решения различных исследовательских и профессиональных задач;

- способность понимать сущность и значение информации в развитии современного общества, осознавать опасности и угрозы, возникающие в этом процессе, соблюдать в профессиональной деятельности требования нормативных правовых актов в области защиты государственной тайны и информационной безопасности;

- способность учитывать в профессиональной деятельности современные тенденции развития компьютерных, информационных и телекоммуникационных технологий, владеть основными методами, способами и средствами получения, хранения, обработки информации, навыками работы с компьютером в сфере профессиональной деятельности;

- способность собирать, обрабатывать, анализировать и систематизировать научно-техническую информацию в сфере профессиональной деятельности, использовать достижения отечественной и зарубежной науки, техники и технологии;

- способность осваивать работу на современном измерительном, диагностическом и технологическом оборудовании, используемом для решения научно-технических задач в области радиотехники, владение основными приемами обработки и представления экспериментальных данных;

в) профессиональных:

- способность анализировать состояние научно-технической проблемы на основе подбора и изучения литературных и патентных источников, определять цели и задачи проектирования;

- способность проектировать специальные радиотехнические системы (устройства), выбирать рациональные решения на всех этапах проектного процесса – от технического задания до производства изделий, отвечающих целям функционирования, технологии производства и обеспечения характеристик объекта, определяющих его качество;

- способность участвовать в испытаниях и сдаче в эксплуатацию образцов, специальных радиотехнических систем;

- способность проводить сбор, обработку, анализ и систематизацию научно-технической информации, анализировать отечественный и зарубежный опыт в сфере профессиональной деятельности;
- способность выполнять моделирование объектов и процессов в целях анализа и оптимизации их параметров с использованием имеющихся средств исследований;
- способность разрабатывать программы экспериментальных исследований и их реализовывать;
- способность проводить построение математических моделей объектов и процессов, выбирать методы их исследования и разрабатывать алгоритмы их реализации;
- способность проводить оптимизацию параметров радиотехнических систем (устройств) с использованием различных методов исследований;
- способность составлять обзоры результатов проводимых исследований и отчеты о них.

Из анализа существа формируемых компетенций следует, что они должны основываться на включении обучаемых в реальный процесс организации научных исследований по специальности подготовки.

В силу того, что военно-специальные кафедры принимают участие в учебном процессе вуза на его различных уровнях (специалитет, переподготовка в рамках высшего профессионального образования, магистратура, адъюнктура) предлагаемые общие подходы к организации деятельности кафедр по формированию компетенций по дисциплинам профессионального и военно-профессионального циклов должны учитывать особенности уровней подготовки, в том числе и подготовку кадров высшей квалификации в адъюнктуре, где важная роль отводится самостоятельной практической НИР, публикации основных ее результатов в научных рецензируемых изданиях и приобретению компетентности в области педагогической и научно-исследовательской деятельности [9, 12].

Исследовательская деятельность должна стать основой современной подготовки выпускников технических вузов, так как современное состояние вооруженной борьбы нуждается в специалистах, способных к восприятию новых идей, принятию нестандартных решений, к активному участию в инновационных процессах, готовых компетентно решать, среди прочего, исследовательские задачи.

Высшее образование должно строиться на том основании, что оно является фактором стратегического развития человека, государства, науки, культуры, производства, военной организации государства и должно способствовать формированию индивидуальной жизненной позиции, определенного стиля деятельности, который часто обозначается как инновационный, творческий, проектный, исследовательский и позволяет отыскивать и осуществлять лучшие решения возникающих проблем. Современный специалист должен быть способным к системному действию в складывающейся профессиональной ситуации, к анализу и проектированию своей деятельности, самостоятельным действиям в условиях неопределенности, обладать стремлением к самосовершенствованию (самопознанию, самоконтролю, самооценке, саморегуляции и саморазвитию) и стремиться к творческой самореализации.

Проблема формирования исследовательских умений, составляющих основу исследовательской деятельности, особенно актуальна для обучающихся в вузах, так как в этом возрасте завершается формирование когнитивных процессов и, прежде всего, мышления.

Именно в этот период характерны развитые формы теоретического мышления, владение методами научного познания, способствующие выработке потребности в интеллектуальной деятельности и проявлению исследовательской инициативы. Организация исследовательской работы обучающихся может успешно осуществляться при изучении дисциплин общепрофессионального блока ООП, а также специальных дисциплин и дисциплин специализации, где создаются необходимые условия для наиболее полной реализации исследовательского подхода в обучении.

ОРГАНИЗАЦИЯ ВОВЛЕЧЕНИЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ В НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКУЮ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ И ЕЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Обращаясь к проблеме организации исследовательской деятельности курсантов, магистрантов и адъюнктов технического вуза, мы непременно рассматриваем понятие «деятельность».

Словарь-справочник по педагогике дает такую трактовку понятия деятельности человека – «необходимое условие его развития, в процессе которого приобретает жизненный опыт, познается окружающая действительность, усваиваются знания, вырабатываются умения и навыки, благодаря чему развивается и сама деятельность».

В основе любой деятельности лежит цель, которая сознательно создается, но основания самой цели лежат вне сферы деятельности – в области человеческих мотивов, ценностей и идеалов [10]. Последние лишь в некоторой степени детерминируются деятельностью, но сами выступают за ее границы. Сегодня становится все более очевидным, что исследовательская деятельность не имеет самостоятельного значения, она приобретает смысл только в контексте своей целевой и ценностной ориентированности.

Главной целью исследовательской деятельности обучающихся является приобретение и совершенствование навыков исследовательской работы.

Знания, полученные в результате исследования, являются следствием познавательной деятельности, направленной на выдвижение, формирование, объяснение закономерностей, фактов, процессов, а, следовательно, и неотъемлемой частью обучения.

Исследовательские умения заключаются в способности осознанно совершать действия по поиску, отбору, переработке, анализу, созданию, проектированию и подготовке результатов познавательной деятельности, направленной на выявление объективных закономерностей обучения, воспитания и развития.

Исследовательская деятельность обучающихся в современном вузе достаточно разнообразна как по содержанию и направлениям, так и по формам и методам.

Выделяют следующие формы учебно-исследовательской работы на уровне специалитета:

- выполнение лабораторных работ;
- написание рефератов;
- участие в предметных олимпиадах;
- подготовку докладов;
- выполнение заданий, содержащих элементы научных исследований;
- выполнение конкретных нетиповых заданий научно-исследовательского характера в период учебных, эксплуатационных, производственных практик и войсковых стажировок;
- изучение теоретических основ методики, постановки, организации выполнения научных исследований по курсам специальных дисциплин и дисциплин специализации;
- подготовку/выполнение курсовых работы и проектов.

Высшей и завершающей период обучения на уровне специалитета формой учебно-исследовательской работы обучающихся является выпускная квалификационная работа.

Научно-исследовательская работа обучающихся также организована в разных формах, к числу которых относятся:

- участие в работе кружков военно-научной работы;
- участие в работе научных семинарах научной школы кафедры;
- участие в научно-практических конференциях;
- подготовка научных статей и докладов;
- индивидуальное или групповое участие обучающихся в работах в рамках государственных, межвузовских или внутривузовских грантов;
- работа в конструкторских, проектных, технологических, научно-информационных, экономических и других бюро, в творческих мастерских и студиях;
- участие в выставках творческих, научных и учебно-методических работ;
- участие в конкурсах мультимедийных работ.

Особого внимания заслуживает моделирование исследовательской деятельности. Метод проектов сегодня занимает ведущее место среди инновационных методов обучения и предоставляет обширные возможности для формирования исследовательских умений, непосредственно сопряженных с опытом их применения в практической деятельности.

Исследовательская работа обучающихся по методу проектов является непрерывной и проводится в течение всего процесса обучения.

Получаемые в ходе экспериментальной работы результаты показали, что отношение обучающихся к приобретению исследовательских умений и навыков проявляется в познавательной активности. Это сложное, многогранное явление, выступающее составной частью профессионального становления.

Для обеспечения требуемой эффективности организации исследовательской деятельности обучающихся необходимо соблюдение следующих педагогических и дидактических условий:

- во-первых, необходимо сформировать ценностное отношение обучающихся к исследовательской деятельности и ее результатам;
- во-вторых, грамотно организовать субъект-субъектное взаимодействие между обучающимся и преподавателем (научным руководителем, научным консультантом) в процессе реализации методов организации исследований;
- в-третьих, создать в вузе такую среду, которая бы способствовала развитию исследовательской деятельности, обеспечивающей синергетическое изучение учебных дисциплин и НИР обучающихся;
- в-четвертых, развивать творческую активность каждого обучающегося на основе предоставления свободы выбора тематики исследования, использования интегративного характера содержания исследовательской работы и учета индивидуального познавательного опыта.

Кроме того, совершенствование научно-исследовательской направленности обучения предполагает:

- ориентацию тестовых материалов теоретического обучения на реальные условия выполнения служебно-боевых задач выпускниками вуза;
- увеличение объема практических заданий и контрольных мероприятий по учебным дисциплинам специальности подготовки;
- совершенствование материально-технической и учебно-методической базы кафедр по практическому выполнению служебно-боевых задач;
- привлечение курсантов, слушателей и адъюнктов к участию в рационализаторской работе кафедры, в научных исследованиях, в редакционно-издательской деятельности, как фактора повышения мотиваций в учебе и ее активности [6].

Таким образом, исследовательская деятельность является необходимой составной частью системы подготовки высококвалифицированного, ориентированного на современный уровень квалификационных требований специалиста, инициативного, способного критически мыслить и заниматься исследовательской работой.

Анализ результатов набора кандидатов на поступление в адъюнктуру вуза последних лет показывает значительное уменьшение числа претендентов на поступление, не позволяющее провести качественный отбор зачисляемых в адъюнктуру. Наблюдается снижение важности мотивационного фактора на поступление, у большинства поступающих в адъюнктуру практически отсутствует опыт проведения научных исследований и как результат – отсутствует научный задел по теме предстоящих исследований, навыки проведения исследований или хотя бы результаты частных экспериментов у претендентов не сформированы. Причем эти недостатки являются производными от результатов обучения выпускников вузов на уровне специалитета и их профессионального роста в период последующей службы в войсках.

В то же время, несмотря на незаконченность реформы Высшей школы, имеющуюся противоречивость и рассогласованность руководящих и нормативно-методических документов официальных регуляторов, продолжается ужесточение требований к качеству научно-квалификационных работ и соблюдению регламентов подготовки, рассмотрения и экспертизы диссертаций. Об этом красноречиво говорят требования к государственной аттестации научных кадров [2–5].

Вместе с тем, наблюдается заметное снижение продуктивности системы подготовки квалифицированных научных кадров в адъюнктуре образовательных учреждений. Она испытывает затруднения в получении отличающихся новизной авторских решений, востребованных органами военного управления и военно-научными организациями для реализации актуальных военно-прикладных задач, в столь сжатые сроки обучения. Во многом это связано с ослаблением научных школ, уходом от дел высококвалифицированных научных руководителей (консультантов), дефицитом опытных научных руководителей (консультантов). Существенным обстоятельством снижения уровня подготовки является утрата контактов с конкретным военным Заказчиком и недопустимо низкая степень участия в совместных НИР и ОКР, лишаящая ценнейших источников актуальных военно-прикладных задач, объективной фактографии и понимания новейших условий функционирования исследуемых военно-технических систем. Отсутствие прикладных задач снижает заинтересованность работы курсантов в военно-научном обществе и затрудняет ведение долгосрочной, плановой работы по отбору талантов в адъюнктуру. Все еще недостаточен уровень публикационной и изобретательской активности научных школ, их участия в конкурсных мероприятиях, грантах и выставках военно-прикладных достижений. В ряде случаев осуществляется формирование даже докторантуры без убедительного научно-прикладного «задела» будущего докторанта в области диссертационного исследования, что приводит в последующем к хроническому отставанию и невыполнению планов работы соискателя ученой степени [6].

Приведенные обстоятельства требуют поиска решений по совершенствованию системы подготовки выпускников вузов (в том числе адъюнктов) по военно-научным специальностям в образовательных учреждениях. В этой связи представляется убедительной зарекомендовавшая себя стратегия упреждения (задела) на профильных кафедрах, связанного с предметом исследований кафедральной научной школы. При этом известно, что «хорошо поставленная задача (проблема) – половина решения», а заблаговременно поставленная ведущими специалистами и прошедшая их экспертизу – залог успеха. Для выпускников вузов и соискателей ученых степеней это обеспечивает соответствие темы диссертации актуальности направлений исследований, а предполагаемым результатам соответствие паспорту научной специальности, новизне и прикладной ценности найденного решения, что обуславливает положительный прогноз завершения выпускной квалификационной работы (диссертационных исследований) в установленный срок.

Для реализации предлагаемых принципов требуется заблаговременно разработать на кафедрах (в научных школах) варианты постановок задач по актуальным направлениям предмета исследования, получить одобрение военных профессионалов и научной общественности. В этой связи востребован аппарат ранжирования и типизации ключевых понятий научного исследования, позволяющий представлять задачи и искомые решения в унифицированном формате, понятном для соискателя и участников экспертизы. При этом должны сохраняться специфика и особенности отраслей военно-научных специальностей и возможность учитывать научные предпочтения научных школ. Типизация формулировок и порядок постановки и решения задач исследования позволят лучше ориентироваться обучаемому в поиске ответов на перечень требуемых квалификационных вопросов.

На рис. 1 представлена предлагаемая вложенная структура типовых понятий, используемых для организации научных исследований и получаемых результатов [12]. Среди них основополагающее значение имеют следующие понятия: проблемная ситуация как доминирующее противоречие в предметной области, объект и предмет исследования, научная проблема и научная задача, научные результаты и научные положения.



Рис. 1. Вложенная структура базовых понятий организации научных исследований

Самым характерным затруднением исследователей является неумение правильно и четко сформулировать научную проблему и научную задачу [13].

Научная проблема – это то, что нужно разрешить, причем ни само научное решение, ни метод его получения не известны.

Научная задача – это то, что надо решить, причем, возможно, что одно из решений или один из методов решения известны. Требуется найти новое решение научной задачи, которое отвечало бы новым условиям и новым целям.

Объект исследования – это та часть материального мира, которой занимается исследователь, например, техническая система, ее элементы или применение по назначению и т. п.

Предмет исследования – это та сторона объекта исследования, те его свойства, та область его приложения, которая исследуется и совершенствуется соискателем, например, облик технической системы, принципы ее построения, эксплуатационные свойства системы, результативность и качество ее применения и т. п.

Научные положения – это выраженные в виде четких формулировок основные научные идеи, как принятые за основу при постановке научного исследования, так и вновь выдвигаемые автором. Научные положения можно разделить на две группы:

- исходные посылки;
- научные результаты.

Исходные посылки – это такие научные положения, которые являются отправными, изначальными при постановке научного исследования.

В качестве исходных посылок могут выступать:

- понятия, термины, категории, определения и т. п.;
- гипотезы, принципы, правила и т. п.;
- предпосылки, допущения, ограничения и т. п.

Научные результаты – это такие научные положения, которые являются итогом, выходными данными научной разработки. Они подразделяются на научные результаты-сведения и научные результаты-факты.

Научные результаты-сведения могут представлять собой:

- закономерности, принципы, правила, отражающие объективно существующие, устойчивые связи явлений, выраженные в качественной или количественной форме;

- выводы, представляющие собой итоговые утверждения констатирующего типа;
- рекомендации, представляющие собой суждения и утверждения как форму перехода к реализации научных результатов.

Научные результаты-факты могут выступать в форме:

- эффектов, отражающих ранее неизвестные проявления свойств объекта исследования, как правило, экспериментального или практического происхождения (к этой категории относятся все известные научные эффекты, носящие имена их открывателей);
- научных фактов, выражающих в числовой мере соответствующие универсальные величины или экспериментальные константы.

Научно-методический аппарат – это совокупность разработанных и принятых к широкому научному использованию (т. е. достаточно апробированных) методов, приемов, путей и средств получения научных результатов, обладающих гарантированной достоверностью.

Всякий научно-методический аппарат, в том числе и новый, можно условно разделить на две части:

- методы и средства получения научного результата;
- методы и средства обоснования достоверности и точности самого научно-методического аппарата.

Усовершенствования научно-методического аппарата могут касаться обеих его частей. Развитие науки в любой области дает массу таких примеров.

Из сказанного следует, что научно-методический аппарат может включать как теоретические и экспериментальные методы исследования, так и эмпирические и эвристические приемы получения научных результатов, причем последние обязательно нуждаются в средствах и методах проверки их достоверности, т. е. верификации.

Новый научный результат – это впервые полученный результат, т. е. такой результат, который ранее не был известен в науке и практике.

Все новые научные результаты по своему содержанию могут быть разделены на две категории:

- научные результаты, которые являются вкладом в науку;
- научные результаты, которые являются вкладом в практику.

Возникает вопрос, когда научный результат становится вкладом в науку? Ответ на этот вопрос очень простой – тогда, когда он обогащает современную систему знаний и методов их получения в определенной области специализации науки.

При формулировке научных результатов, являющихся вкладом в науку, могут быть использованы следующие ключевые конструкции словесного описания:

- 1) концепция, теория, теоретические основы, методология, методологические основы, модель, метод, методика, методические основы (доказанного, обоснованного) научного положения;

- 2) научно-методический, методический, математический аппарат обоснования (анализа, оценивания, синтеза, построения, оптимизации, прогнозирования и т. п.);

- 3) теоретическое, теоретико-экспериментальное, экспериментальное обоснование;

- 4) закономерности, принципы, правила формирования, построения, использования, ранжирования, оснащения и т. п.;

- 5) математические модели или математические (формализованные) описания.

В верхней части рис. 1 доминирует понятие «Военно-техническая задача», как собирательный образ целей и задач. Она мотивирует военно-практическую актуальность целей исследования и определяет значимость прикладных результатов. Оцениваемым результатом научно-исследовательской деятельности является представление решения научной задачи.

Научная задача (НЗ) выражается в виде пары суждений (слов), которые включают предмет исследования (ПИ) и требуемый научный результат (НР), что схематично можно представить выражением

$$НЗ \Leftrightarrow ПИ + НР.$$

Решение научной задачи (РНЗ) как процесс получения научного результата (не путать с результатом) схематично может быть представлен в виде взаимосвязанной тройки компонентов, а именно предмета исследования (ПИ), требуемого научного результата (НР) и метода исследования (МИ), следующим образом:

$$РНЗ \Leftrightarrow ПИ + НР + МИ.$$

Возникает вопрос: что значит найти новое решение научной задачи? Очевидно, что любое изменение, уточнение или усовершенствование компонентов правой части второго выражения вносит элемент новизны в решение научной задачи.

Новое решение научной задачи имеет место в следующих ситуациях:

- предмет исследования расширен, уточнен, лишен каких-то ограничений;
- поставлены новые цели исследования, выражаемые через требуемые научные результаты, что меняет глубину исследования, его масштаб, область практических приложений;
- применен новый метод достижения поставленных целей или усовершенствован, развит, приспособлен один из известных методов с гарантией или доказательством достоверности результата.

Основные виды результатов научного исследования, получаемые на различных этапах его проведения, и их взаимосвязь с задачами исследования и требованиями, предъявляемыми к результатам, представлены на рис. 2 [12].



Рис. 2. Основные виды результатов решения научной задачи

На рисунке типовые результаты решения научной задачи упорядочены по значимости их вклада в структурированный базис корректного пространства решений. Каждое научное положение отвечает за свой аспект решения задачи.

Модель отображает взаимосвязь параметров исследуемых процессов и обосновывает существование решения новой задачи.

Метод доказывает возможность однозначного решения в условиях выбранных ограничений и допущений.

Методика демонстрирует устойчивость и эффективность результата в серии экспериментов на конкретных значениях данных.

Полученные в ходе исследований (решения научной задачи, разрешения научной проблемы) результаты необходимо соответствующим образом оформить, апробировать (выступить с сообщением, докладом на научной конференции) и опубликовать.

Особую озабоченность должны проявлять выпускающие военно-специальные кафедры по подготовке к итоговой аттестации приобретенных компетенций выпускниками – проведению итогового междисциплинарного экзамена (ИМЭ) по специальности, разработке и защите выпускной квалификационной работы, а для выпускников магистратуры и адъюнктуры – по подготовке к защите выпускной квалификационной работы в форме диссертации.

Корректировка и поддержание в актуальном состоянии перечня типовых ситуационных задач, практических заданий, учебной техники и средств автоматизации, уточнение принимаемых выпускниками на ИМЭ решений, а также их отработка на тренажах и консультациях в период подготовки к выпускным испытаниям, должны носить плановый, организованный характер с возможностью использования фондов оценочных средств по всем учебным дисциплинам, выносимым на ИМЭ.

При этом каждому из осваиваемых видов деятельности (квалификационных требований) выпускниками вуза, как и итоговой аттестации выпускников адъюнктуры, определенной руководящими документами третьего уровня высшего образования, должна соответствовать определенная методика проверки навыков организации и ведения НИР.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современная система подготовки выпускников военных вузов, обеспечивающая достижение ими соответствия квалификационным требованиям ФГОС ВО, путем эффективного освоения обучающимися ООП ВО, объективного контроля знаний и оценивания сформированности компетенций, должна выстраиваться как комплексный процесс планирования, организации, проведения НИР на кафедре в рамках работы научной школы и вовлечения в нее обучающихся [4].

В системе оценочных средств, ориентированных на компетентностный подход, важное место должны занимать модели и комплексные средства оценивания навыков научно-исследовательской деятельности, а также необходим целый ряд взаимосвязанных мероприятий по организации вовлечения в нее обучающихся. Для этого разработанные основные образовательные программы в рамках ФГОС ВО, рабочие программы дисциплин (модулей) и практик, учебные планы и другие учебно-методические материалы необходимо увязать с моделями обучения, формирования и развития компетенций, а также разработать направления корректирующих действий в обучении по результатам контроля и мероприятия по совершенствованию организации НИР на выпускающих кафедрах.

Рассмотренный в статье подход к систематизации НИР, планированию и вовлечению в нее обучающихся позволяет достичь требуемого уровня соответствующих компетенций выпускников [11].

Список используемых источников

1. Рекомендации по проектированию и использованию оценочных средств при реализации основной образовательной программы высшего профессионального образования (ООП ВПО) нового поколения / Е.И. Сафонова [и др.]; отв. ред. В.В. Минаев. – М.: Минобрнауки России. ФГБОУ ВПО РГГУ, 2013. – 75 с.

2. Коркоценко М.Н. Методика формирования военно-профессиональных компетенций у курсантов летного вуза. – URL: <https://vvo.ric.mil.ru/Stati/item/116047/> (дата обращения: 16.12.2001).

3. *Гормаиш А.М.* Особенности осуществления контроля полученных знаний в военном учреждении // Сборник тезисов докладов II Республиканской научно-практической конференции «Современные тенденции развития военного образования», 20 апреля 2016 г. – Минск: Издательский центр БГУ, 2016. – С. 99–101.
4. *Маецкий А.В.* Комплексный характер проблем системы высшего профессионального образования // Молодой ученый. – 2010. – № 12 (23), т. I. – С. 236–240.
5. *Кудин В.А.* Практическая направленность обучения: состояние и пути совершенствования // Вестник Санкт-Петербургского университета МВД России. – 2008. – №4(40). – С. 4–11.
6. *Шацкая М.В.* Исследовательская деятельность студентов как фактор повышения качества подготовки специалистов // Молодой ученый. – 2010. – № 12 (23), т. II. – С. 140–142.
7. *Гарманов В.М.* Совершенствование методического обеспечения образовательных практических ситуационных заданий // Юридическая наука и правоохранительная практика. – 2016. – № 4(38). – С. 196–202.
8. *Матузов А.А.* Практические особенности подготовки военного специалиста в условиях инновационных преобразований // Сборник тезисов докладов II-ой Республиканской научно-практической конференции «Современные тенденции развития военного образования», 20 апреля 2016 г. – Минск: Издательский центр БГУ, 2016. – С. 123–125.
9. *Дударёнок Е.П.* Особенности и характеристика подготовки научных кадров высшей квалификации в условиях инновационных преобразований. Сборник тезисов докладов II Республиканской научно-практической конференции «Современные тенденции развития военного образования», 20 апреля 2016 г. – Минск: Издательский центр БГУ, 2016. – С. 102–105.
10. *Давыдов В.В.* Проблемы развивающего обучения: опыт теоретического и экспериментального психологического исследования. – М.: Педагогика, 1986. – 240 с.
11. *Бережнова Е.В., Краевский В.В.* Основы учебно-исследовательской деятельности студентов. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 128 с.
12. Современные проблемы подготовки научных кадров высшей квалификации / А.А. Рахманов [и др.] // Вооружение и экономика. – 2019. – № 4(48). – С. 59–82.
13. *Замарин А.И., Медведев В.М.* Подготовка и защита диссертаций: методическое пособие. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2010. – 222 с.

В.Л. Кабалин,
кандидат военных наук, доцент;
В.Н. Прищепа,
кандидат военных наук;
А.В. Северенко,
кандидат технических наук

ПОВЫШЕНИЕ ПОЛЕВОЙ ВЫУЧКИ КУРСАНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УЧЕБНОГО КОМПЛЕКСА «УЧЕБНОЕ ТАКТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ»

В статье рассмотрен педагогический эксперимент, целью которого является совершенствование методики обучения курсантов и повышение качества проведения практических и тактических занятий по учебной дисциплине «Общая тактика»; определены показатели, характеризующие результативность и эффективность деятельности командира при управлении подразделениями в различных условиях боевой обстановки; оценен исходный уровень подготовленности обучающихся перед началом эксперимента и достигнутый уровень по его завершению; выработаны методические рекомендации по применению в образовательном процессе учебного комплекса № 2 «Учебное тактическое поле».

Ключевые слова: педагогический эксперимент, учебно-тренировочный комплекс, тренажер, навык, повышение эффективности обучения в тактической подготовке.

Исторический опыт показывает, что совершенствование средств вооруженной борьбы влечет за собой повышение требований к боевой выучке и чем выше эти требования, тем жестче требования к боевой подготовке (БП) войск, особенно в связи с тенденцией перехода преимущественно на контрактный принцип комплектования ВС РФ.

Средства обучения, если их рассматривать в отдельности, не могут решить учебные задачи.

В учебном процессе важно использовать методику комплексного использования актуальных средств обучения и обеспечения ими. Современному преподавателю необходимо знать и применять такую методику на высоком уровне.

Для качественного процесса обучения необходимо осознать, что комплексность охватывает научно-обоснованные подходы и методики к планированию, применению средств обучения, отвечающих современным требованиям.

После рассмотрения требований учебных программ можно выделить критерии комплексности обучения:

- 1) необходимый минимум средств обучения;
- 2) учет дидактических функций и возможностей средств обучения.

В процессе обучения выделяют следующие функции: образовательную, развивающую и воспитательную. Комплексность позволяет реализовать их с помощью средств обучения.

Обеспечивая преподавание средствами обучения, необходимо подбирать или создавать такие средства, которые обеспечили бы решение учебных задач (целей) при наименьших затратах на их разработку, производство, закупку, аренду и т. п. [1, 2]. Также следует обязательно учитывать требования безопасности при использовании таких средств в учебном процессе.

Объем комплексного применения средств обучения выбирается преподавателями, исходя из их педагогического опыта, содержания учебно-методического материала, условий учебного процесса и др. Можно выделить следующие требования, предъявляемые к средствам обучения:

- а) целесообразность;
- б) информативность;

- в) наглядность;
- г) безопасность.

Достижение высокого уровня слаженности подразделений, поддержание их постоянной готовности к ведению боя требует качественного нового подхода не только к организации учебного процесса, но и к его материально-техническому обеспечению [3, 4].

По итогам проведения заседания кафедры была разработана матрица и выдвинута гипотеза предстоящего эксперимента.

Тактическое мышление является таким видом деятельности, при котором необходимо учитывать множество тактических элементов, к числу которых относятся:

- контроль и анализ тактической обстановки;
- своевременность принятия решения;
- контроль доведения решения и полнота его выполнения [5, 6].

Анализ эффективности обучения курсантов академии по дисциплине «Общая тактика» выявил неполное соответствие современным требованиям традиционных методов подготовки.

Процесс обучения курсантов по формированию необходимых навыков и умений должен строиться в условиях активного применения современных технических средств [7, 8].

При проведении педагогического эксперимента выдвинута следующая гипотеза: если в экспериментальной группе подготовку сфокусировать на изучении основ дисциплины с активным использованием учебного комплекса «Учебное тактическое поле», то формирование профессиональных навыков и умений будет более качественным, что обеспечит условия для успешной реализации возможностей каждого обучающегося. Как следствие, будет достигнут запланированный уровень профессиональной компетентности.

Возможности учебного комплекса «Учебное тактическое поле» основанные на разделении тактических действий на поле боя на отдельные элементы с возможностью их коррекции и последующем соединении этих элементов в единое целое, обеспечит правильное понимание выполняемых действий и повлечет за собой успешное не только овладение техникой действий в бою, но и выполнение наиболее сложного по структуре целостного действия, каким является тактическое мышление.

В ходе педагогического эксперимента ставилась цель выявить качественные различия в формировании навыков у обучающихся в условиях традиционно сложившейся системы подготовки и у обучающихся с использованием современных обучающих технических средств на основе применения учебного комплекса «Учебное тактическое поле», а также сравнить итоговую результативность профессиональной компетентности.

Основными целями педагогического эксперимента являлись:

- 1) совершенствование методики обучения курсантов по дисциплине «Общая тактика»;
- 2) повышение эффективности и качества проведения практических и тактических занятий по дисциплине «Общая тактика».

Были определены учебные группы из числа курсантских подразделений, которые вошли в состав участников эксперимента в качестве контрольной и экспериментальной групп.

Эксперимент проводился в течение пятнадцати месяцев, за время которых с обучающимися проведено шесть практических занятий объемом 28 часов, два тактических занятия объемом 12 часов по дисциплине «Общая тактика» и четыре тактических занятия объемом 22 часа по военно-профессиональной практике «Полевой выход, ротное тактическое и тактико-специальное учения».

Планом проведения эксперимента было предусмотрено проведение эксперимента по следующим этапам:

- организационный этап – 1 месяц;
- диагностический этап – 3 месяца;
- исследовательский этап – 4 месяца;
- аналитический этап – 6 месяцев;
- заключительный этап – 1 месяц.

Для достижения целей эксперимента были поставлены следующие задачи:

1. Определить основные показатели результативности и эффективности командира подразделения при управлении подразделением в различных условиях боевой обстановки.
2. Оценить уровень подготовки курсантов учебных групп на момент начала эксперимента.
3. Собрать и проанализировать данные, получаемые в ходе эксперимента;
4. Контролировать изменение основных показателей уровня сформированных компетенций в ходе эксперимента.
5. Оценить полученные результаты.
6. Выработать методические рекомендации по применению в учебном процессе учебного комплекса «Учебное тактическое поле».
7. Оформить итоговый отчет.

На основании гипотезы педагогического эксперимента определены его ожидаемые результаты:

- повышение качества обучения по дисциплине «Общая тактика» по оценочным показателям в среднем на 10–15%;
- определение направленности развития методического обеспечения дисциплины «Общая тактика», внедрение новых методик обучения;
- совершенствование учебно-материальной базы дисциплины «Общая тактика»;
- оценка возможности применения учебно-материальной базы дисциплины «Общая тактика» для других оперативно-тактических и общевойсковых дисциплин («Военно-инженерная подготовка», «Военная топография», «РХБ защита»).

В ходе диагностического этапа со всеми участниками эксперимента проведена базовая теоретическая подготовка в рамках учебного плана прохождения дисциплины «Общая тактика».

С началом практической отработки приемов и способов действий обучающихся руководитель занятия на практическом занятии № 1 проводит первый контрольный замер на тактической полосе препятствий.

Первый контрольный замер заключается в преодолении тактической полосы (далее – ТП), представляющей собой участки с препятствиями (рубежами). Преодоление тактической полосы выполняют по 4 раза. До и после преодоления тактической полосы проводят тактический разбор действий обучающихся, с указанием основных ошибок. Учитывается среднее время прохождения тактической полосы и количество правильно преодоленных препятствий (рубежей). Данные показатели дают возможность обеспечить полную комплексную качественную и количественную оценку тактической подготовки обучающихся для ближнего боя.

Для ТП на равнинной местности на глубине 500 метров оборудуются 8 технических элементов, предназначенных для выполнения обучающимися боевых приемов и действий в бою за ротный опорный пункт (РОП) звена «отделение-взвод» в составе расчета или одного военнослужащего.

ТП ближнего боя разработана как интегральная полная системная последовательность требуемых тактикой боя боевых приемов и действий в соответствии с действующими тактическими нормативами. Основными недостатками этой ТП являются: отдельные нормативы (разделенные друг от друга), условия их выполнения для определенных категорий обучающихся и трехбалльная (раздельная) оценка их выполнения.

Для оценки эффективности боевых действий обучающихся, определяемой на ТП, рассчитываются следующие показатели для альтернативных вариантов оружия и экипировки.

1. Эффективность выполняемых приемов (способов) действий при прохождении ТП (λ):

$$\lambda = \frac{60 \times \sum_{i=1}^k m_i}{\sum_{i=1}^k t_i}, \quad (1)$$

где t – время выполнения приема (способа) действий в секундах;
 k – число параллельных опытов (количество личного состава);

m – количество преодолеваемых участков.

2. Комплексный показатель динамики боя на ТП рассчитывается как отношение эффективности выполнения нормативов и преодоления ТП к общему времени боя на ТП на всю глубину (Q):

$$Q = \frac{60 \times \sum_{i=1}^k m_i \times k}{\sum_{i=1}^k t_i \sum_{i=1}^k T_i}, \quad (2)$$

где T – общее время боя на ТП (время выполнения боевой задачи).

Второй контрольный замер заключается в выполнении норматива по принятию решения командиром подразделения (взвода) на бой, который включает в себя отдачу устного боевого приказа (T_1) и оформление рабочей карты командира на бой (T_2).

По результатам контрольных замеров получены результаты, указанные в табл. 1–3.

Таблица 1

Оценочные показатели преодоления ТП

Оценки	Группы			
	Контрольные		Исследуемые	
	1	2	1а	2а
«Отлично»	11	8	9	9
«Хорошо»	1	4	5	6
«Удовлетворительно»	12	12	13	10
«Неудовлетворительно»	-	-	-	-
Средний балл	3,96	3,83	3,85	3,96

Таблица 2

Оценочные показатели выполнения нормативов

Оценки	Группы			
	Контрольные		Исследуемые	
	1	2	1а	2а
«Отлично»	8	6	9	7
«Хорошо»	4	6	2	8
«Удовлетворительно»	12	12	16	10
«Неудовлетворительно»	-	-	-	-
Средний балл	3,83	3,75	3,74	3,88

Таблица 3

Временные показатели контрольных замеров

Показатели	Группы			
	Контрольные		Исследуемые	
	1	2	1а	2а
$T_{общ}$	5.40	5.37	5.35	5.33
Q_{1cp}	1,27	1,3	1,3	1,2
T_{1cp}	16	14	15	15
T_{2cp}	27	28	25	25

По результатам проведения контрольных замеров были определены уровни общей подготовки, уровни знаний основ общевойскового боя, проведена оценка правильности действий по командам руководителя занятия при выполнении тактических нормативов.

По результатам проведенных замеров были сделаны следующие выводы:

– начальный уровень полевой выучки обучающихся контрольных и исследуемых групп примерно одинаков и варьируется по среднему баллу от 3,83 до 3,96 за преодоление ТП, а за отработку нормативов – от 3,74 до 3,88 (рис. 1), что недостаточно для решения задач современного общевойскового боя;

– повышение полевой выучки обучающихся требует качественного нового подхода не только к методике организации и проведения практических и тактических занятий, но и к их материально-техническому обеспечению.

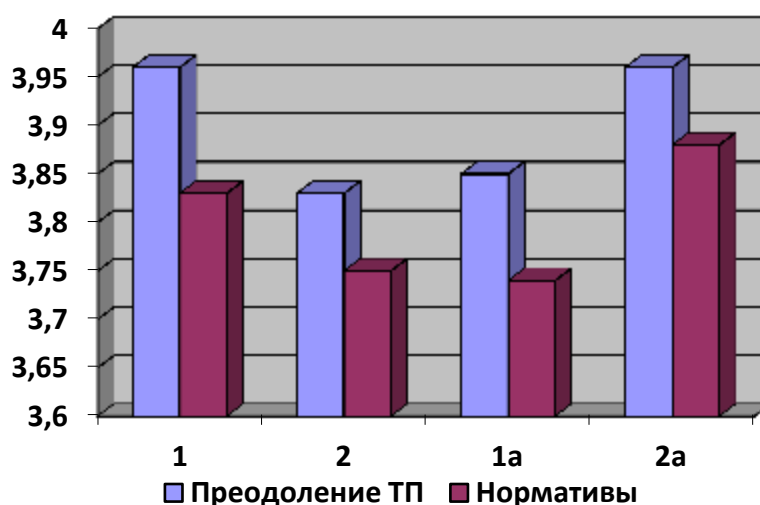


Рис. 1. Сравнительный анализ оценочных результатов

Исследовательский этап проведения всех занятий осуществлялся в ходе ротно-тактических учений с использованием учебного комплекса «Учебное тактическое поле» по программе военно-профессиональной практики.

Учебный комплекс «Учебное тактическое поле» включает в свой состав:

1. Учебное место № 1 «Опорный пункт мсв», состоящий из следующих элементов:

- позиция мотострелкового отделения;
- позиция БМП;
- позиция минометного взвода.

2. Учебное место № 2 «Участок инженерных заграждений» включает в себя:

- малозаметные проволочные заграждения на низких кольях;
- проволочные заграждения на высоких кольях.

3. Учебное место № 3 «Тактическая полоса» включает в себя:

- русло реки;
- разрушенный мост;
- подземный лаз;
- разрушенная стена.

С контрольными группами занятия проводились в соответствии с существующей методикой проведения занятий, изложенной в учебно-методических материалах дисциплины «Общая тактика» с использованием общего рельефа местности и отдельного элемента (учебное место № 1 «Опорный пункт мсв») учебного комплекса «Учебное тактическое поле».

С экспериментальными группами занятия проводились с полным использованием учебного комплекса № 2 «Учебное тактическое поле» на трех учебных местах (учебное место № 1

«Опорный пункт мсв»; учебное место № 2 «Участок инженерных заграждений»; учебное место № 3 «Тактическая полоса»).

Особенностью методики проведения практических и тактических занятий являлось использование учебных мест № 2 и 3. Причем занятия были организованы и проводились в составе боевых групп и отделений.

В ходе проведенных занятий получены результаты, указанные в табл. 4–6.

Таблица 4

Оценочные показатели преодоления ТП

Оценки	Группы			
	Контрольные		Исследуемые	
	1	2	1а	2а
«Отлично»	6	10	16	19
«Хорошо»	14	13	10	5
«Удовлетворительно»	4	1	1	1
«Неудовлетворительно»	-	-	-	-
Средний балл	4,08	4,38	4,56	4,72

Таблица 5

Оценочные показатели выполнения нормативов

Оценки	Группы			
	Контрольные		Исследуемые	
	1	2	1а	2а
«Отлично»	8	10	15	16
«Хорошо»	12	11	11	8
«Удовлетворительно»	4	3	1	1
«Неудовлетворительно»	-	-	-	-
Средний балл	4,17	4,29	4,52	4,60

Таблица 6

Временные показатели динамики боя

Показатели	Группы			
	Контрольные		Исследуемые	
	1	2	1а	2а
$T_{\text{общ}}$	5,38	5,36	5,32	5,31
$Q_{1\text{ср}}$	1,23	1,25	1,2	1,1
$T_{1\text{ср}}$	15	15	13	12
$T_{2\text{ср}}$	25	26	22	23

По результатам проведенных занятий сделан вывод о том, что уровень полевой выучки обучающихся контрольных и исследуемых групп повысился по среднему баллу от 4,08 до 4,72 за преодоление ТП, а за отработку нормативов – от 4,17 до 4,60 (рис. 2), что вполне соответствует уровню подготовки для решения задач современного общевойскового боя.

Аналитический этап представлял собой процесс формирования выводов общего характера из полученных в эксперименте результатов путем сравнительного анализа полученных данных.

С использованием полученных табличных данных построены гистограммы изменения показателей эффективности динамики боя на ТП в зависимости от выполняемых приемов (способов) действий, в том числе при прохождении ТП (рис. 3, 4).

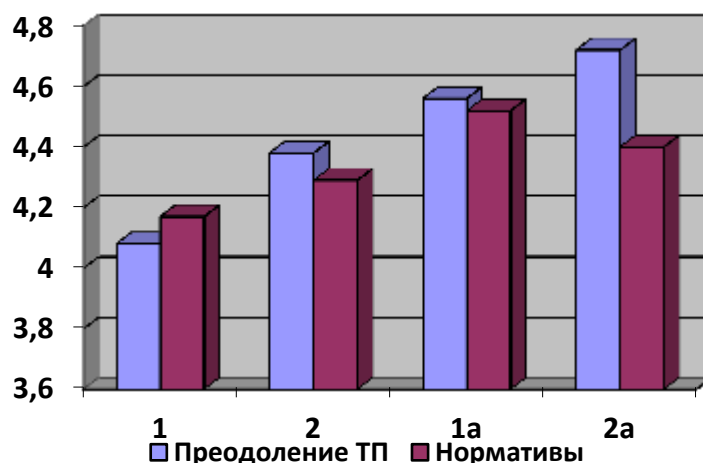


Рис. 2. Сравнительный анализ оценочных результатов

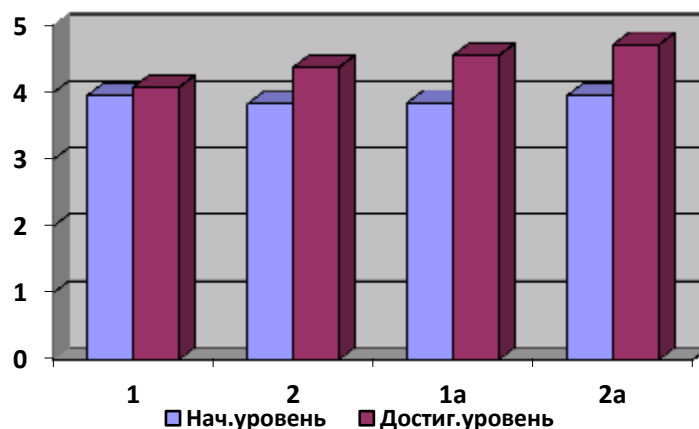


Рис. 3. Сравнительный анализ оценочных результатов, за счет выполнения приемов и способов действий

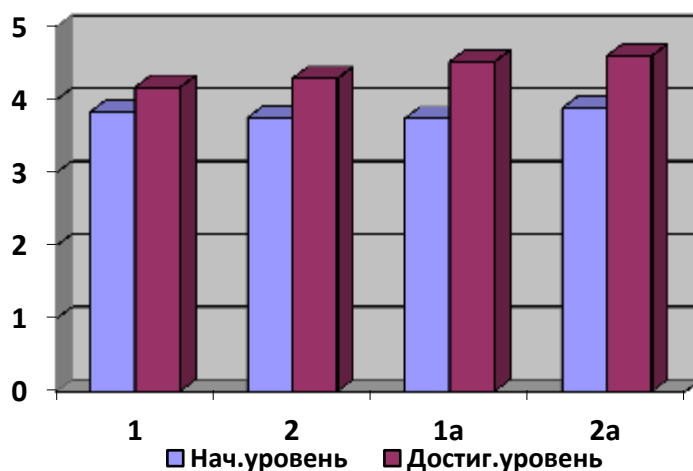


Рис. 4. Сравнительный анализ оценочных результатов, за счет выполнения нормативов

Эффективность полевой выучки в практике обучения определялась сравнением результатов контрольной и экспериментальной групп на протяжении всего эксперимента.

Проведена итоговая оценка качественных изменений в полевой выучке испытуемых, полученных вследствие использования в практике обучения учебного комплекса «Учебное тактическое поле».

На заседаниях кафедры было проведено обсуждение полученных результатов.

Определены и сформулированы окончательные итоги проведения педагогического эксперимента.

Проведено обсуждение справедливости выдвинутой гипотезы педагогического эксперимента. Проведен анализ выполнения поставленных в начале эксперимента целей и задач.

Основные результаты, полученные в ходе эксперимента, позволяют сделать следующие выводы.

1. Полевая выучка обучающихся с использованием учебного комплекса «Учебное тактическое поле» в экспериментальных группах повысилась в среднем на 10–15%.

2. Применение методики обучения по дисциплине «Общая тактика» с использованием учебного комплекса «Учебное тактическое поле» способствует качественному приросту умений и навыков в тактической подготовке обучающихся при обращении с оружием, что влечет за собой более успешное развитие профессиональных компетенций и получение ими практического опыта выполнения более сложного по структуре целостного действия, каким являются организация и управление подразделением в общевойсковом бою.

3. Совершенствование полевой учебно-материальной базы кафедры необходимо осуществлять за счет дооборудования учебного комплекса «Учебное тактическое поле» дополнительными учебными местами, позволяющими отрабатывать все вопросы ведения современного общевойскового боя и организации боевого обеспечения. Это позволит применять учебно-материальную базу дисциплины «Общая тактика» для других общевойсковых и оперативно-тактических дисциплин («Военно-инженерная подготовка», «Военная топография», «РХБ защита»).

Список используемых источников

1. Кабалин В.Л., Инюшева Е.А., Селихина Н.В. Моделирование системы организации контроля формирования профессиональной компетентности военных специалистов // Вестник Костромского государственного университета имени Н.А. Некрасова. – 2015. – № 1. – С. 95–99.

2. Брушлинский А.В. Субъект: мышление, учение, воображение. – М.: Издательство Московского психолого-социального института, 2008. – 406 с.

3. Ильин Е.П. Умения и навыки: нерешенные вопросы // Вопросы психологии. – 1986. – Вып. 2. – С. 138–147.

4. Гришин В.П. Развитие тактического мышления у курсантов военных училищ: учебно-методическое пособие для военных вузов. – М.: Воениздат, 1991. – 256 с.

5. Кабалин В.Л., Инюшева Е.А. Психофизиологические тренировки, используемые для формирования профессионально важных качеств военных специалистов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2015. – № 3. – С. 54–58.

6. Кабалин В.Л., Прищеп В.Н., Сергеев А.Н. Формирование компетенций тактического мышления командира // Педагогический журнал. – 2019. – Т. 9, № 3А. – С. 93–100.

7. Тактика: батальон, рота: учебник / С.А. Батюшкин [и др.]; под ред. В.И. Попова. – М.: Воениздат, 2009. – 414 с.

8. Тактика. Взвод (отделение, танк): учебник: в 2 ч. / Н.П. Мойсеенко [и др.]. – М.: ВУНЦ СВ «ОВА ВС РФ», 2016. – Ч. 1. – 606 с.

М.А. Сквazников,
кандидат технических наук, доцент;
М.А. Чебурков

ОЦЕНИВАНИЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ПРИГОДНОСТИ БУЧАЮЩИХСЯ ПО СПЕЦИАЛЬНОСТИ «ЭЛЕКТРОННЫЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ»

В статье проведен анализ взаимосвязи результатов экспериментального тестирования кандидатов на обучение и результатов обучения личного состава (курсантов) академии по учебным дисциплинам основной профессиональной образовательной программы по специальности «Электронные и оптико-электронные приборы и системы специального назначения». Представлено описание электронного теста для выявления профессионально важных качеств специалистов, описана методика проведения экспериментального тестирования кандидатов.

Выявлены различной степени тесноты корреляционные связи между результатами тестирования и результатами обучения по отдельным группам дисциплин. Установлено, что необходима доработка электронного теста в части расширения спектра тестируемых психофизиологических качеств, необходимых для изучения дисциплин специализации и базового профессионального цикла.

Ключевые слова: профессиональный психологический отбор, профессионально важные качества, корреляционный анализ, электронный тест, теснота связей, учебные дисциплины, основная профессиональная образовательная программа, кандидат.

ВВЕДЕНИЕ

Профессиональный психологический отбор (ППО) в Вооруженных силах РФ является одним из видов профессионального отбора и предназначен для качественного комплектования воинских должностей гражданами, призываемыми или добровольно поступающими на военную службу. В процессе профессионального отбора осуществляется определение степени профессиональной пригодности человека к конкретной профессии или должности в соответствии с нормативными требованиями, проверка соответствия профессионально важных качеств требованиям военно-профессиональной деятельности [1].

Мероприятия по профессиональному психологическому отбору в военно-учебные заведения включают проведение в период работы приемной комиссии социально-психологического изучения, психологического и психофизиологического обследования кандидатов и вынесение заключений об их профессиональной пригодности к обучению.

Однако, используемые в ходе ППО тесты и методики носят общий характер, не учитывают специфики будущей деятельности специалистов и их профессионально важные качества.

Следовательно, необходимость дополнительного тестирования кандидатов диктуется требованиями заказчика подготовки и объективно определяется спецификой деятельности выпускников профильной кафедры.

Выявление факторов, оказывающих наиболее существенное влияние на результаты обучения, на адаптацию обучающихся к новым условиям, актуально для всех вузов.

Имеется ряд исследований [2–5], посвященных оцениванию корреляционной связи успеваемости учащихся в довузовский период с академической успеваемостью (особенно на первом курсе – в период адаптации к вузовской среде), выявлению наиболее значимых для успешности обучения социальных факторов (таких как материальное положение, пол, обучение в профильном классе, участие в школьных мероприятиях по выбору профессии и т. д.).

Одним из способов целенаправленного развития мотивации к получению инженерного образования рассматривается довузовская инженерная подготовка на базе лицея с углубленным изучением профессионально важных дисциплин [6].

Однако, в научных публикациях отсутствуют методики, позволяющие выявлять профессионально важные качества и, что еще более важно, проводить тестирование и отбор кандидатов на обучение по конкретной специальности. Поэтому, целью проведенных исследований явилось совершенствование системы профессионального психологического отбора на основе выявления специфических и наиболее важных профессиональных качеств подготавливаемых специалистов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ КАНДИДАТОВ НА ОБУЧЕНИЕ ПО СПЕЦИАЛЬНОСТИ В ОБЛАСТИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Совместные исследования, проведенные с заказчиком подготовки, позволили определить следующий перечень основных профессионально важных качеств курсантов, которые необходимо дополнительно оценить на этапе профессионального психологического отбора в ВКА имени А.Ф. Можайского по специальности 12.05.01 «Электронные и оптико-электронные приборы и системы специального назначения» [7]. К таким качествам относятся следующие:

- 1) чувствительность и острота зрительного анализатора:
 - световая чувствительность;
 - контрастная чувствительность (различение градаций яркости);
 - цветовая (спектральная) чувствительность;
 - острота зрения;
- 2) пространственное воображение (зрительное представление объектов);
- 3) наглядно-образное мышление;
- 4) зрительная память;
- 5) точность зрительного восприятия.

Для оценивания профессиональной пригодности кандидатов, поступающих в Военно-космическую академию имени А.Ф. Можайского для обучения по специальности 12.05.01, был разработан электронный тест, который используется во время профессионального отбора с 2012 года.

Тест состоит из нескольких модулей:

- модуль проверки чувствительности и остроты зрительного анализатора;
- модуль проверки пространственного воображения и способности к наглядно-образному и аналитическому мышлению;
- модуль проверки общей эрудиции;
- модуль проверки внимательности;
- модуль проверки зрительной памяти;
- модуль проверки точности зрительного восприятия.

Модуль проверки чувствительности и остроты зрительного анализатора включает задания по обработке фотоснимков с низким качеством восприятия (малой (или избыточной) яркостью, низким яркостным и (или) цветовым контрастом), а также с малоразмерными объектами (сопоставимыми с линейным разрешением).

Модуль проверки пространственного воображения и способности к наглядно-образному и аналитическому мышлению включает в себя три типа заданий (три этапа теста):

а) тестовое изображение представляет собой фотоснимок планового вида объекта (самолета, автомобиля, здания). Предлагается четыре варианта ответа в виде фотографий объектов

в различных проекциях. Необходимо умозрительно построить нужную проекцию, выбрать значимые признаки и по ним определить объект, соответствующий оригинальному снимку;

б) тестовое изображение представляет собой фотографию объекта в различных проекциях. Предлагается четыре варианта ответа в виде фотоснимков планового вида различных объектов. Необходимо умозрительно построить нужную проекцию, выбрать значимые признаки и по ним определить оригинальный снимок, соответствующий объекту на фотографии;

в) тестовое изображение представляет собой фотоснимок фрагмента объекта и его тень. Предлагается четыре варианта ответа в виде фотографий объектов в различных проекциях. Необходимо по тени умозрительно построить трехмерную модель фрагмента объекта и по нему определить объект, соответствующий оригинальному снимку.

Модуль проверки общей эрудиции включает в себя набор фотоснимков различных объектов, например: водонапорная башня, католический собор, аэродромный командный диспетчерский пункт, поле для игры в гольф, полоса препятствий, боновые ограждения и т. д. Под каждым снимком предлагается четыре варианта ответа в виде названия изображенного объекта. Идентификация объекта затрудняется его плановым видом. В ходе прохождения теста проверяется общая эрудиция, знания о различных объектах инфраструктуры, а также способность построения трехмерной модели по плановому изображению.

Модуль проверки внимательности содержит фотоснимки, на которых изображены различные объекты. Некоторые объекты на снимках малозаметны или имеют окраску под фон местности. Требуется обнаружить и подсчитать все объекты, изображенные на снимке. Предлагается четыре варианта ответа.

Модуль проверки зрительной памяти содержит фотоснимки и набор вопросов по каждому из них. В ходе теста сначала предлагается рассмотреть изображение и запомнить объекты, которые присутствуют на нем. Затем изображение исчезает и появляется соответствующий набор вопросов. Полнота ответа на предложенные вопросы характеризует зрительную память человека.

Модуль проверки точности зрительного восприятия включает задания с набором фотоснимков, на которых представлены объекты, различающиеся незначительными значениями признаков (цветом (тоном), размерами, формой, расположением и формой отдельных деталей и т. д.). Необходимо выявить объекты, отличающиеся от остальных.

Общее время на выполнение всех модулей теста ограничено. В ходе всего тестирования за каждый вопрос начисляются баллы. Причем количество баллов за каждый вопрос разное и зависит от его сложности. В конце теста подсчитывается общее количество баллов, число выполненных заданий и время, за которое был пройден тест.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕСТИРОВАНИЯ И ИХ ВЗАИМОСВЯЗИ С РЕЗУЛЬТАТАМИ ОБУЧЕНИЯ ПО УЧЕБНЫМ ДИСЦИПЛИНАМ ОСНОВНОЙ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

В рамках проведенных научных исследований был применен корреляционный анализ результатов тестирования курсантов и их взаимосвязи с результатами обучения по учебным дисциплинам основной профессиональной образовательной программы по специальности 12.05.01.

Корреляционный анализ представляет собой метод обработки статистических (экспериментальных) данных, с помощью которого измеряется теснота взаимосвязи случайных величин.

Целью данного метода является оценивание тесноты (силы) связи между некоторыми случайными величинами, которые характеризуют изучаемый процесс, например, процесс подготовки специалиста в области высшего образования.

При этом при корреляционном анализе могут решаться следующие задачи:

- измерение степени связности случайных событий (явлений);
- отбор факторов (факторных признаков), оказывающих наиболее существенное влияние на результат целенаправленного процесса (результативный признак);
- выявление неизвестных ранее причинных связей [8–10].

Связь является корреляционной, когда каждому значению факторного признака (признака, обуславливающего происходящие изменения) соответствует некоторое среднее значение результативного признака. При этом разным значениям переменной соответствуют различные средние значения результата процесса.

Для наглядного отображения корреляционной связи строится график (корреляционное поле). На оси абсцисс откладываются значения переменной (признака-фактора), по оси ординат – среднее значение результативного признака, а точками показываются их сочетания. По расположению точек можно судить о наличии связи. Вид и теснота взаимосвязи между случайными величинами показываются линией тренда, представляющей собой геометрическое отображение средних значений факторного признака. Величина угла между линией тренда и осью абсцисс пропорциональна тесноте (силе) корреляционной связи [11].

Показатели тесноты корреляционной связи характеризуют зависимость результативного признака от исследуемого фактора.

Вследствие того, что значения результативных и факторных признаков распределены по нормальному закону, в качестве показателя тесноты корреляционной связи использовался линейный коэффициент корреляции (коэффициент корреляции Пирсона) [12]. При расчете этого показателя учитываются не только отклонения значений результативных и факторных признаков от среднего, но и сама величина этих отклонений (т. е. дисперсия). Линейный коэффициент корреляции рассчитывается по следующей формуле:

$$r_{XY} = \frac{\text{cov}_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{\sum(X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sqrt{\sum(X - \bar{X})^2 \sum(Y - \bar{Y})^2}}$$

где cov_{XY} – ковариация двух случайных величин X и Y :

$$\text{cov}_{XY} = M[(X - \bar{X})(Y - \bar{Y})] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y});$$

\bar{X}, \bar{Y} – выборочные средние;

σ_X, σ_Y – среднеквадратические отклонения случайных величин X и Y ;

n – размер выборки.

Линейный коэффициент корреляции (ЛКК) изменяется в пределах от -1 до +1. Если коэффициент корреляции равен 0, то взаимосвязь между случайными величинами отсутствует. Крайние значения (-1; +1) предполагают наличие полной корреляции (взаимосвязи) исследуемых признаков. Положительные значения линейного коэффициента корреляции свидетельствуют о прямой связи, отрицательные – об обратной.

Критерии тесноты связи оценивались по шкале Чеддока [13]:

0,1 < r_{XY} < 0,3 – корреляционная связь слабая;

0,3 < r_{XY} < 0,5 – корреляционная связь умеренная;

0,5 < r_{XY} < 0,7 – корреляционная связь заметная;

0,7 < r_{XY} < 0,9 – корреляционная связь высокая;

0,9 < r_{XY} < 1,0 – корреляционная связь весьма высокая.

Целью проведенного анализа являлось оценивание тесноты (силы) корреляционной связи между результатами тестирования курсантов и результатами обучения по учебным дисциплинам основной профессиональной образовательной программы.

При проведении корреляционного анализа использовались выборочные данные (оценки промежуточных и итоговых аттестаций, а также оценки за прохождение теста) четырех учебных групп (объем выборки $n = 99$).

Было сформировано четыре группы выборок:

- 1) средний балл диплома о высшем образовании;
- 2) средний балл дисциплин математического и естественно-научного цикла;
- 3) средний балл дисциплин базового профессионального цикла;
- 4) средний балл дисциплин специализации.

Проверка соответствия выборочных данных нормальному закону распределения проводилась с использованием критерия согласия Пирсона χ^2 (хи-квадрат).

Корреляционные поля и линии тренда для четырех групп выборок показаны на рис. 1.

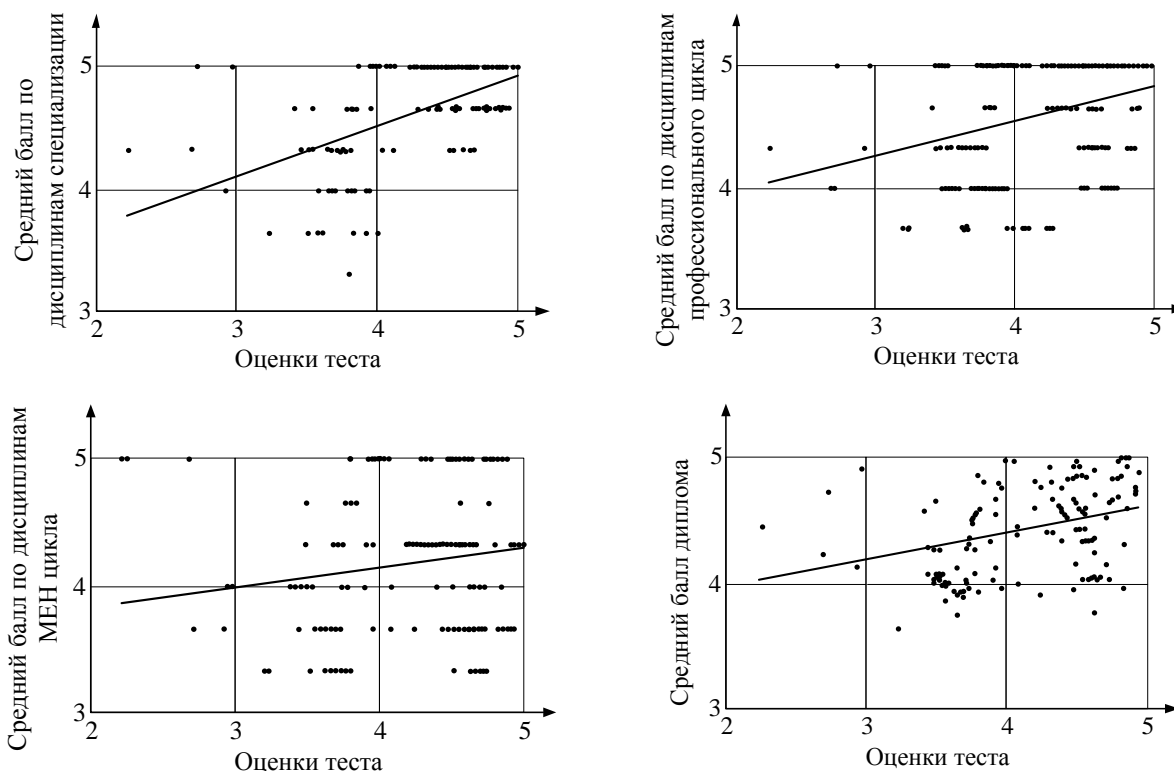


Рис. 1. Корреляционные поля оценок теста и результатов обучения

Значения линейных коэффициентов корреляции оценок теста и результатов обучения по дисциплинам в четырех группах выборок представлены в табл. 1.

Таблица 1

Значения линейных коэффициентов корреляции

Тип ЛКК	Значение ЛКК	Теснота связи по шкале Чеддока
Линейный коэффициент корреляции оценок теста и результатов обучения по дисциплинам специализации	0,5178	Корреляционная связь заметная, прямая
Линейный коэффициент корреляции оценок теста и результатов обучения по дисциплинам базового профессионального цикла	0,3609	Корреляционная связь умеренная, прямая
Линейный коэффициент корреляции оценок теста и результатов обучения по дисциплинам математического и естественно-научного цикла	0,1664	Корреляционная связь слабая, прямая
Линейный коэффициент корреляции оценок теста и среднего балла диплома о высшем образовании	0,3319	Корреляционная связь умеренная, прямая

Анализ полученных значений линейных коэффициентов корреляции позволяет сделать следующие выводы.

1. Наиболее тесная корреляционная связь выявлена между результатами тестирования и результатами обучения по дисциплинам специализации. По шкале Чеддока корреляционная связь заметная, носит прямой характер (прямая линейная зависимость между величинами). Это обусловлено направленностью электронного теста на определение специфических особенностей кандидатов, проявляющихся, в основном, при изучении учебных дисциплин по специализации в области дистанционного зондирования Земли.

2. Наиболее слабая корреляционная связь выявлена между результатами тестирования и результатами обучения по дисциплинам математического и естественно-научного цикла. Слабый характер корреляционной связи объясняется отсутствием в электронном тесте заданий, связанных с качествами, необходимыми при изучении математических и естественно-научных дисциплин.

3. Умеренная корреляционная связь выявлена между результатами тестирования и результатами обучения по дисциплинам базового профессионального цикла, а также интегрированным показателем качества подготовки курсанта – средним баллом диплома о высшем образовании. Объясняется данный результат тем, что многие качества, оцениваемые при электронном тестировании (такие, например, как наглядно-образное мышление, зрительная память, пространственное воображение, качество зрительного анализатора) необходимы при изучении дисциплин базового профессионального цикла и большинства дисциплин основной профессиональной образовательной программы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований сделаны следующие выводы.

Необходима доработка электронного теста в части расширения спектра тестируемых психофизиологических качеств, необходимых для изучения дисциплин специализации и базового профессионального цикла.

При проведении психологического профессионального отбора кандидатов на обучение по специальности в области оптико-электронных приборов и систем специального назначения необходимо комплексное тестирование абитуриентов с использованием разнородных психофизиологических тестов для проверки соответствия кандидата требованиям выбранной специальности.

Выявление и оценивание важных профессиональных качеств кандидатов на обучение по выбранной специальности позволяет успешно и эффективно осваивать дисциплины, преподаваемые в рамках учебного плана выпускающей кафедры, а в будущем успешно выполнять свои функциональные обязанности на первичных должностях.

Список используемых источников

1. Руководство по профессиональному психологическому отбору в Вооруженных Силах Российской Федерации. – М.: МО РФ, 2005. – 62 с.
2. Сапрыкина Т.А. О переходе «школа-вуз»: предикторы успеваемости студентов-первокурсников // Высшее образование в России. – 2017. – № 6 (213). – С. 76–87.
3. Хавенсон Т.Е., Соловьева А.А. Связь результатов Единого государственного экзамена и успеваемости в вузе // Вопросы образования. – 2014. – № 1. – С. 176–199.
4. Польдин О.В. Прогнозирование успеваемости в вузе по результатам ЕГЭ // Прикладная эконометрика. – 2011. – Т. 1, № 21. – С. 56–69.

5. *Кунтурова Н.Б., Селихина Н.В.* Особенности исследования профессиональной компетентности офицерских кадров силовых структур // Актуальные проблемы физической и специальной подготовки силовых структур. – 2014. – № 1. – С. 70–74.
6. Довузовская инженерная подготовка в международном контексте / М.Е. Журавлева [и др.] // Высшее образование в России. – 2018. – № 1 (219). – С. 54–60.
7. Концепция инновационной технологии обучения по дисциплинам профессионального цикла подготовки специалистов в области обработки данных дистанционного зондирования Земли в образовательных учреждениях высшего профессионального образования / А.И. Алтухов [и др.] // Труды ВКА имени А.Ф. Можайского. – 2012. – № 636. – С. 54–57.
8. *Гмурман В.Е.* Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 2004. – 479 с.
9. *Елисеева И.И.* Эконометрика: учебник. – М.: Финансы и статистика, 2007. – 576 с.
10. Эконометрия / В.И. Суслов [и др.]. – Новосибирск: СО РАН, 2005. – 744 с.
11. *Сидняев Н.И.* Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных: учеб. пособие для магистров. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство – 2015. – 496 с.
12. Статистические методы обработки результатов наблюдений / под ред. Р.М. Юсупова. – Б.М.: МО СССР, 1984. – 563 с.
13. *Спирин Н.А., Лавров В.В.* Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента: конспект лекций (отдельные главы из учебника для вузов) / под общ. ред. Н.А. Спирина. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. – 257 с.

А.П. Данелян,
кандидат военных наук;
В.О. Кацик,
кандидат технических наук, доцент;
С.Н. Кокшаров,
кандидат военных наук

МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ УРОВНЯ ГОТОВНОСТИ ОФИЦЕРОВ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ВОИНСКОЙ ЧАСТИ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЗАДАЧ В СОСТАВЕ ГРУППЫ БОЕВОГО УПРАВЛЕНИЯ

Представлена методика оценивания уровня готовности офицеров основных подразделений воинской части к выполнению задач в составе группы боевого управления (ГБУ), реализация которой позволит осуществлять научно обоснованный подбор подготовленных офицеров воинской части для исполнения специальных обязанностей в составе различных формирований ГБУ, создавать резерв офицеров для замены, при необходимости, основного состава ГБУ, а также рекомендовать аттестационной комиссии воинской части выдвижение офицеров на высшие командно-штабные должности и вести актуальную базу данных на офицеров для учета их уровня подготовленности к выполнению специальных обязанностей должностных лиц ГБУ.

Ключевые слова: управление, группа боевого управления, офицеры, показатели уровня подготовленности офицеров к исполнению специальных обязанностей.

ВВЕДЕНИЕ

В высших степенях боевой готовности (ВС БГ) для эффективного управления подразделениями воинской части при непосредственной подготовке к боевым действиям и в ходе их ведения создается временный орган управления, развертываемый на пункте управления, – группа боевого управления (ГБУ).

Создание ГБУ обусловлено необходимостью всестороннего оценивания сложившейся обстановки, повышения оперативности принятия решений и постановки задач подразделениям воинской части с целью предоставления им достаточного времени для подготовки к выполнению поставленных задач в ВС БГ.

Важной задачей при формировании ГБУ является качественный подбор офицеров, готовых к выполнению специальных обязанностей должностных лиц в ее составе.

В настоящее время у командира (начальника штаба) воинской части нет необходимого методического инструментария по подбору офицеров основных подразделений воинской части в состав ГБУ, а также по определению рационального состава смен ГБУ.

В этих условиях задача разработки методики обоснования рационального состава смены ГБУ воинской части по уровню ее подготовленности к выполнению задач управления является актуальной.

МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО СОСТАВА СМЕНЫ ГБУ ВОИНСКОЙ ЧАСТИ

Количественный и качественный состав ГБУ определяется решением командира воинской части.

Как правило, в состав ГБУ входят [1]:

- центр боевого управления (ЦБУ);
- группа информации (ГИ);

– пункты управления боевым обеспечением (БО), техническим обеспечением, тыловым обеспечением, медицинским обеспечением, морально-психологическим обеспечением (МПО), связью, защиты государственной тайны (ЗГТ).

В состав ЦБУ назначаются офицеры штаба и служб воинской части, которые обладают необходимыми компетенциями для исполнения специальных обязанностей должностных лиц ГБУ. В состав других элементов ГБУ могут назначаться подготовленные офицеры основных подразделений воинской части в виду ограниченности штатной численности офицеров штаба и служб воинской части.

Исходя из существующей практики, подбор офицеров основных подразделений воинской части для назначения на должности ГБУ проходит без должной всесторонней оценки их уровня подготовленности к решению управленческих задач, на основе личных предпочтений командиров (начальников) этих подразделений.

Вариант перечня должностей ГБУ, на которые могут быть назначены офицеры основных подразделений воинской части, представлен в табл. 1.

Таблица 1

Вариант перечня должностей ГБУ, на которые могут быть назначены офицеры основных подразделений воинской части

№ п/п	Должность офицера в составе ГБУ	Потребная численность
1	Начальник пункта управления МПО (для 2-й смены)	1
2	Начальник пункта управления ЗГТ (для 2-й смены)	1
3	Оператор поста разведки и охранения пункта управления БО (для 2-й смены)	1
4	Оператор поста ЗГТ пункта управления ЗГТ (для 2-й смены)	1
5	Направленец на вышестоящие звенья управления ГИ (для 1-й и 2-й смен)	2
6	Направленец на нижестоящие звенья управления ГИ (для 1-й и 2-й смен)	2

Ответственность за подбор офицеров основных подразделений воинской части для назначения на должности ГБУ возлагается на командира и начальника штаба воинской части.

Системы управления воинских частей с одинаковой организационной и технической основой будут функционировать с различной эффективностью в ВС БГ в зависимости от того, из каких офицеров сформированы смены ГБУ и насколько они подготовлены к выполнению задач управления.

Анализ уровня подготовленности офицеров к выполнению специальных обязанностей должностных лиц ГБУ можно осуществить только в ходе и по итогам командно-штабных учений (тренировок) (КШУ (КШТ)). Количество их реализации в одном периоде обучения войск не позволяет опробовать всех подготовленных офицеров на должностях ГБУ и провести их ротацию внутри элементов ГБУ. Поэтому командир (начальник штаба) воинской части лишен возможности определения рационального состава смены ГБУ.

Один из подходов к определению рационального состава смены ГБУ воинской части предложен в данной статье.

Методика обоснования рационального состава смены ГБУ воинской части включает две частные методики: первая предназначена для определения уровня подготовленности офицеров основных подразделений воинской части к выполнению специальных обязанностей

должностных лиц ГБУ, а вторая – для определения уровня подготовленности смены ГБУ к выполнению задач управления.

Структурная схема данной методики представлена на рис. 1.

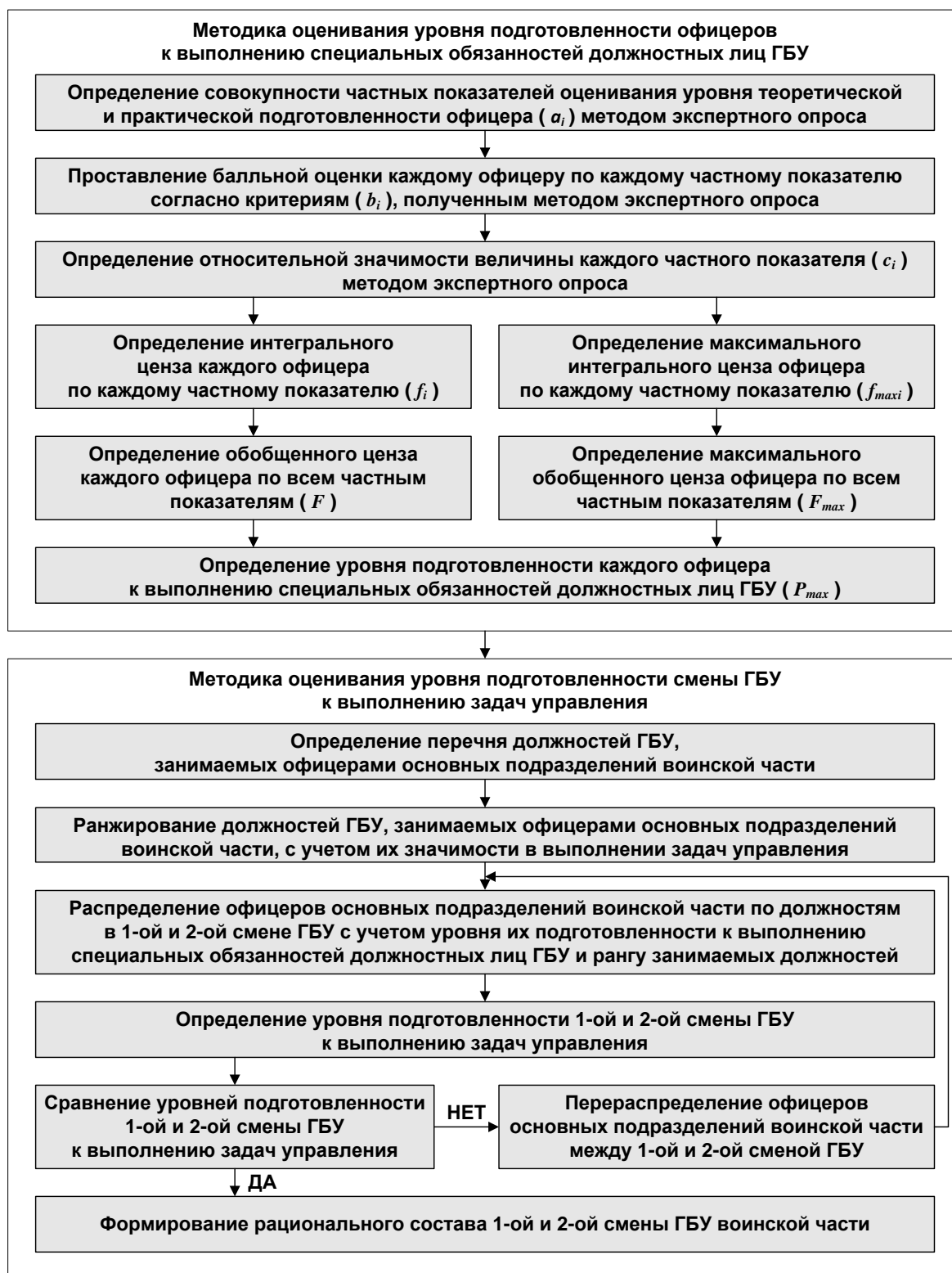


Рис. 1. Структурная схема методики обоснования рационального состава смены ГБУ воинской части

Оценивание уровня подготовленности офицеров основных подразделений воинской части к выполнению специальных обязанностей должностных лиц ГБУ выполняется в следующей последовательности.

1. Определяется совокупность частных показателей оценивания уровня теоретической и практической подготовленности офицера (a_i) методом экспертного опроса.

Вариант перечня частных показателей оценивания уровня теоретической и практической подготовленности офицера основного подразделения воинской части представлен в табл. 2.

Таблица 2

Вариант перечня частных показателей оценивания уровня теоретической и практической подготовленности офицера основного подразделения воинской части

№ п/п	Частные показатели, a_i	Значимость, c_i	Высшая оценка, в баллах, B_{\max}	Высший ценз, $f_{\max i}$
1	Образование общее	5	5	25
2	Образование военное	20	5	100
3	Стаж службы в войсках	10	5	50
4	Стаж службы на командно-штабных должностях	20	5	100
5	Оценка по предметам обучения в системе профессионально-должностной подготовки	20	5	100
6	Оценка подразделения за КШУ (КШТ), в котором числится по штату офицер	10	5	50
7	Морально-деловые качества	15	5	75
Интегральные показатели		100	5	500

2. Проставляется балльная оценка каждому офицеру по каждому частному показателю согласно критериям (b_i), полученным методом экспертного опроса (в пятибалльной системе от единицы до пяти).

Источниками балльных оценок служат личное дело (послужной список, материалы аттестации, классная квалификация), ведомости приема зачета по предметам обучения в системе профессионально-должностной подготовки и служебная характеристика.

Оценка по первому пункту определяется следующим образом:

- основное общее – 3 балла;
- среднее общее – 4 балла;
- среднее общее (на базе суворовского училища или кадетского корпуса) – 5 баллов.

Оценка по второму пункту определяется следующим образом:

- окончил военное училище (академию) по программе специалитета – 3 балла;
- окончил магистратуру – 5 баллов;

Оценка по третьему пункту определяется следующим образом:

- менее 5 лет – 1 балл;
- от 5 до 7 лет – 2 балла;
- от 7 до 10 лет – 3 балла;
- от 10 до 12 лет – 4 балла;
- свыше 12 лет – 5 баллов.

Оценка по четвертому пункту определяется следующим образом:

- менее 1 года – 1 балл;
- от 1 до 2 лет – 2 балла;
- от 2 до 3 лет – 3 балла;
- от 3 до 4 лет – 4 балла;
- свыше 4 лет – 5 баллов.

Оценка по пятому пункту определяется по среднему баллу оценок, полученных при сдаче зачетов по предметам обучения в системе профессионально-должностной подготовки.

Оценка по шестому пункту определяется по оценке подразделения за КШУ (КШТ), в котором числится по штату офицер.

Оценка по седьмому пункту определяется из служебной характеристики офицера, данной его непосредственным начальником. Особое внимание уделяется участию офицера в различных конкурсах тактической направленности и его организаторским способностям.

3. Определяется относительная значимость величины каждого частного показателя (c_i) методом экспертного опроса, при этом сумма оценок должна быть равна 100:

$$C = \sum_{i=1}^N c_i = 100, \quad (1)$$

где c_i – относительная значимость i -го частного показателя;

N – количество частных показателей.

4. Балльная оценка умножается на относительную значимость частного показателя. Произведение составляет интегральный ценз каждого офицера по каждому частному показателю:

$$f_i = b_i \times c_i, \quad (2)$$

где f_i – интегральный ценз офицера по i -му частному показателю;

b_i – балльная оценка офицера по i -му частному показателю;

c_i – относительная значимость i -го частного показателя.

5. Последовательное сложение всех величин интегрального ценза офицера дает обобщенный ценз офицера по всем частным показателям:

$$F = \sum_{i=1}^N f_i, \quad (3)$$

где F – обобщенный ценз офицера по всем частным показателям;

f_i – интегральный ценз офицера по i -му частному показателю.

6. Высшая балльная оценка по каждому частному показателю постоянно равна «пяти». Она умножается на относительную значимость частного показателя. Произведение составляет максимальный интегральный ценз офицера по каждому частному показателю:

$$f_{\max_i} = B_{\max} \times c_i, \quad (4)$$

где f_{\max_i} – максимальный интегральный ценз офицера по i -му частному показателю;

B_{\max} – высшая балльная оценка по каждому частному показателю ($B_{\max} = 5$);

c_i – относительная значимость i -го частного показателя.

7. Последовательное сложение всех величин максимального интегрального ценза офицера дает максимальный обобщенный ценз офицера по всем частным показателям:

$$F_{\max} = \sum_{i=1}^N f_{\max_i}, \quad (5)$$

где F_{\max} – максимальный обобщенный ценз офицера по всем частным показателям;

f_{\max_i} – максимальный интегральный ценз офицера по i -му частному показателю;

N – количество частных показателей.

8. После расчета максимального обобщенного ценза офицера вычисляется уровень подготовленности каждого офицера к выполнению специальных обязанностей должностных лиц ГБУ:

$$P_{\max} = \frac{F}{F_{\max}}, \quad (6)$$

где P_{\max} – уровень подготовленности офицера к выполнению специальных обязанностей должностных лиц ГБУ;

F – обобщенный ценз офицера по всем частным показателям;

F_{\max} – максимальный обобщенный ценз офицера по всем частным показателям.

Полученное значение уровня подготовленности офицера к выполнению специальных обязанностей должностных лиц ГБУ будет использоваться для определения его места в списке подготовленных офицеров основных подразделений воинской части.

Такой процедуре должны быть подвергнуты все офицеры основных подразделений воинской части, что позволит составить список подготовленных офицеров к выполнению специальных обязанностей должностных лиц ГБУ, а также провести оценивание уровня подготовленности смен ГБУ к выполнению задач управления.

Оценивание уровня подготовленности смены ГБУ к выполнению задач управления выполняется в следующей последовательности.

1. Определяется перечень должностей ГБУ, занимаемых офицерами основных подразделений воинской части. Пример перечня должностей ГБУ приведен в табл. 1.

2. Производится ранжирование должностей ГБУ, занимаемых офицерами основных подразделений воинской части, с учетом их значимости в выполнении задач управления.

3. Офицеры основных подразделений воинской части распределяются по должностям в 1-й и 2-й сменах ГБУ с учетом уровня их подготовленности к выполнению специальных обязанностей должностных лиц ГБУ и рангу занимаемых должностей.

4. Для определения уровня подготовленности 1-й и 2-й смен ГБУ к выполнению задач управления вычисляется сравнительный ранг всех должностей ГБУ, представленных в перечне, по формуле

$$R_j = 1 - \frac{N_j - 1}{N}, \quad (7)$$

где R_j – ранг должности ГБУ;

N_j – порядковый номер должности ГБУ в упорядоченном перечне;

N – общее количество учитываемых должностей ГБУ.

Полученные сравнительные ранги суммируются.

Для дальнейшей работы полученные значения рангов нормируются, т. е. вычисляется доля каждой должности ГБУ в общей сумме рангов, которая принимается за 100 %. Нормирование проводится по формуле

$$\tilde{R}_j = \frac{R_j}{\sum R_j} \times 100, \quad (8)$$

где \tilde{R}_j – нормированный ранг должности ГБУ;

R_j – ранг должности ГБУ.

Вычисляется уровень подготовленности смены ГБУ к выполнению задач управления по формуле

$$P_{ГБУ} = \sum_{j=1}^J P_j \times \tilde{R}_j, \quad (9)$$

где $P_{ГБУ}$ – уровень подготовленности смены ГБУ;

P_j – уровень подготовленности офицера к выполнению специальных обязанностей должностных лиц ГБУ;

\tilde{R}_j – нормированный ранг должности ГБУ.

Для 1-й и 2-й смен ГБУ по формуле (9) вычисляются их уровни подготовленности к выполнению задач управления, которые выражаются в процентном отношении от максимального уровня подготовленности ГБУ.

5. Осуществляется сравнение уровней подготовленности 1-й и 2-й смен ГБУ к выполнению задач управления. Это делается с целью формирования рациональных составов смен ГБУ по уровню подготовленности к выполнению задач управления.

6. В случае необходимости производится перераспределение офицеров основных подразделений воинской части между 1-й и 2-й сменами ГБУ.

7. Формируются рациональные составы 1-й и 2-й смен ГБУ воинской части.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная методика оценивания уровня готовности офицеров основных подразделений воинской части к выполнению задач в составе ГБУ может быть эффективным инструментом в руках командира и начальника штаба воинской части для оценивания уровня подготовленности офицеров воинской части к выполнению специальных обязанностей должностных лиц ГБУ и оценивания уровня подготовленности смен ГБУ к выполнению задач управления.

Реализация методики позволит:

1) производить обоснованный подбор подготовленных офицеров основных подразделений воинской части на должности ГБУ;

2) составлять резерв офицеров на случай отсутствия или замены офицеров основного состава ГБУ (отпуск, командировка, болезнь, увольнение);

3) определять офицеров основных подразделений воинской части, которых можно в дальнейшем выдвинуть на высшие должности или назначить на командно-штабные должности;

4) вести актуальную базу данных на офицеров воинской части, с помощью которой можно будет выстраивать рейтинг (отслеживать уровень подготовленности) офицеров для выполнения специальных обязанностей должностных лиц ГБУ.

Список используемых источников

1. Группа боевого управления. – URL: https://encyclopedia.mil.ru/encyclopedia/dictionary/details_rvsn.htm?id=12973@morfDictionary (дата обращения: 25.10.2020).

Interaction process operator-and-hardware-software-complex conceptual model / E.S. Abasina, S.S. Semenov, V.G. Fedorov, S.V. Fedorova // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 678. – P. 8–16.

In the paper the interaction process structure of complex human-machine system's «operator – software – hardware complex» elements is determined. The structural dependence of the operator's activity on the graphical user interface elements structure, helps the operator controls the software and hardware complex to achieve the human functioning- the eyelid-machine system goal, and their parameters are presented. The human – machine system functional reliability estimating by the probability of error – free and timely implementation of the prescribed functioning method is introduced. This estimation based on the proposed interaction process structure and the operator's activity on the graphical user interface parameters dependence.

Key words: functional reliability, graphical user interface, operator's activity reliability, human-machine system.

Kazakhov B.D., Marchenko M.V., Petukhov A.M. Features of the management of the military organizational and technical system under the influence of destabilizing factors // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 678. – P. 17–22.

In article describes the methodological approach to the formation of technology of management technology for military organizational and technical systems that integrate management variants under the influence of destabilizing factors.

Key words: management bodies, military organizational and technical systems, technology of management.

Averkiev N.F., Salov V.V., Khasanov A.Y. Features of the formation of an orbital grouping of spacecraft with an unstable ballistic structure for determining the location of radio emission sources // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 678. – P. 23–31.

The concept of spacecraft orbital group with unstable ballistic structure is introduced and its main characteristics are given. A scheme for formation of spacecraft orbital group with unstable ballistic structure forming spacecraft clusters for determining the location of radio emission sources on the Earth's surface is presented.

Key words: spacecraft, orbital group, unstable ballistic structure, location of radio emission source.

1. Bogachyov S.A., Vlasov S.A., Kubasov I.Y. The frequency of the spacecraft's survey of a given parallel from the ascending or descending part of the orbit // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 678. – P. 32–42.

Analytical dependences of the estimation of the periodicity of the spacecraft's survey of a given parallel from the ascending or descending part of the orbit are presented. The periodicity indicator is the maximum duration of the break in the survey of all parallel points, expressed in the number of days and turns. The dependencies are presented for the number of turns per day performed by the spacecraft, more than one, and the value of the viewing bandwidth without restrictions.

Key words: periodic survey of the Earth's surface, survey band, daily shift, laying of survey bands.

Brodskiy M.S., Zvonarev V.V., Popov A.S. Method of constructing probabilistic space on multiple joint events for calculation of probabilities of bit errors of reception of radio signals with QPSK modulation in case of interference // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 678. – P. 43–50.

The general methodological approach to calculation of probabilities of bit errors of reception of four-position phase-manipulated signals (FM-4) based on construction of probabilistic space on multiple joint events of reception (transmission) of symbols with bit signs is proposed. Calculated probabilities of signal symbols transition are used. Plots of probabilities dependencies on bit energy are constructed. Bit error probabilities are compared without coding and with Gray coding. The results of the article allow you to determine bit errors in the presence of structural interference.

Key words: probabilities of symbol and bit errors, four-position phase manipulation, probabilistic space, multiple joint events.

Sakhno I.V. The search and detection of phase-shift keyed signals during transition to processing on a nonlinear time scale with the fractal images features using // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 678. – P. 51–60.

The article considers an approach to the organization of phase-shift keyed signals correlation processing with the using the fractal images features and the technology of transition to signal processing on a nonlinear time scale. The results of experimental processing of the technology for receiving and processing continuous phase-shift keyed signals on a nonlinear time scale are presented.

Key words: phase-shift keyed signals, fractal mappings, space-time processing, signal detection, correlation technique, software receiver, nonlinear time scale.

Alexeev V.F., Kolesnikov D.D., Medyanikov D.O. Methodology of geodetic support of the elements of the running aerodrome of state aviation // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 678. – P. 61–67.

The article provides a methodology for geodetic support of the runway of an airfield of state aviation using modern geodetic measuring instruments. The performed experimental measurements showed that modern measuring instruments provide the required accuracy of determining geodetic data on the runway.

Key words: airfield, geodetic support, runway.

Grigorev A.N., Dudin E.A., Komrakov D.N. Model of multi-route optical-electronic survey of an area object from space // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 678. – P. 68–77.

The article presents the results of the development of an analytical apparatus for evaluating the potential effectiveness of multi-route optical-electronic survey of an area object performed by a spacecraft on a single flight turn. As an indicator of the survey performance, the value of the area captured with the specified requirements for one cycle of using the spacecraft is taken. The developed mathematical model of optical-electronic survey of an area object takes into account the key parameters of the survey, the requirements for the photogrammetric quality of the images obtained, the spatial properties of the area object and the characteristics of the earth remote sensing spacecraft. During the formalization of multi-route optoelectronic survey, restrictions and assumptions are formulated, on the basis of which a system of equations describing the relationship between the considered survey parameters and the specified requirements is obtained. The solution of the obtained system of equations is presented, which allows us to get an explicit estimate of the number of potentially feasible routes for shooting an area object characterized by a given elongation. Using the simulation approach, the adequacy of the developed model for particular conditions of shooting an area object is checked. Separate control examples show the results of calculating the potential effectiveness of optoelectronic survey of an area object characterized by different elongation.

Key words: remote sensing, spacecraft, onboard special complex, area object, multi-route optical-electronic survey, photogrammetric quality.

Devyatkin A.M., Pankov A.V. Integration of information analytic methods as improvement of information solutions // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 678. – P. 78–87.

Recent transformations carried out by the Department of defense in the field of information support of decision-making have significantly changed the essence of the information-gathering and analysis. Continuous increase of information flow requires the adoption of new methods of data processing. The traditional methods are being replaced by the new ones – automation technologies of intelligent processing of heterogeneous data, operational modeling of solutions, and quick configuration of the toolbox to the subject area. In the situational conditions for the realization of artificial intelligence methods characterized by the completeness of data and the quality of object models (level of learning) the results of the decisions are not uniformly precise. The results of the non-uniformly precise identification of object states may be integrated which would enhance the quality of analytical work.

Key words: identification of object states, neural networks, probabilistic analysis, integrated information-processing, modeling.

Dudin E.A., Zajcew V.V., Roshkov V.V. Procedure for constructing normals to boundary of an area object based on a binary bitmap image // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 678. – P. 88–94.

The article presents results of development of a mathematical apparatus for constructing normals to boundary of an areal object, which is necessary for solving problem of analyzing boundaries of areal objects, in particular, based on remote sensing data. The source data is a binary image of area objects obtained as a result of mathematical modeling or shooting flat objects located on the earth's surface. The mathematical apparatus for constructing normals to boundary of an area object includes procedures for morphological processing of binary images, composing curve equation from coordinates of points using Lagrange polynomials, constructing a normal to a parametrically defined curve at a given point. The results of an experimental study of developed mathematical apparatus for constructing normals to boundary of an area object are presented.

Key words: remote sensing, areal object, object boundary in image, morphological processing of binary images, parametric form of curve recording, Lagrange polynomial.

Eremeev I.Y., Makovskiy V.N., Smirnov A.N. Method for identification of a partly observed telecommunication infrastructure based on entropic analysis of dynamic topology // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 678. – P. 95–105.

The article deals with the problem of identifying the state of partially observed telecommunications infrastructure in the information field of representation of discrete systems with dynamic topology in the space of observed parameters.

Key words: telecommunications infrastructure, communication system with dynamic network topology, identification.

Kuzmichev V.A., Pilkevich S.V. Approach to the aggregation of network monitoring objects based on granular ontologies // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 678. – P. 106–112.

The article discusses an approach to the organization of storage and processing of multidimensional fuzzy data and knowledge about network monitoring objects. As an implementation of the mechanism of semantic scaling, a method of granulating information is proposed. The purpose of this work is to demonstrate the possibility of applying the theory of

granular ontologies to information contained in the accounts of users of social networks, thereby contributing to a decrease in the dimension of the initial data and the formation of alternative sets of equivalence classes. The performed computational experiment showed a high degree of sensitivity of the method under study to the parameters of the initial data – information about the users of social networks. A stable relationship has been fixed between the number of granules and their dimension, which can be expressed by a power function.

Key words: ontologies, granular computing, information aggregation, social networks.

Biryukov D.N., Vorobiev A.M., Yastrebov A.V. Experience in preparing and conducting computer security competitions // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 678. – P. 113–131.

A description of the approved approach to the preparation and use of a complex of software and hardware for holding competitions in the field of computer security in the Capture the Flag format is presented. A method for automatic detection of attacks on the competition platform is proposed.

Key words: Capture the Flag, CTFd, computer security, competitions, information system resource monitoring.

Burlaka I.M., Pilkevich S.V. Investigation of the strength of cryptographic hash functions in application to information security problems // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 678. – P. 132–136.

The article discusses the results of an experimental study of the resistance of cryptographic hash functions in relation to the protection of password information when using computer systems of various configurations. A study of current recommendations implemented in the framework of the security policy governing the safe creation and storage of passwords was conducted.

Key words: cryptographic hash function, password information, dictionary, rainbow table, user identification, SSD drive.

Zima V.M., Kryukov R.O. Integration of various types of automated systems and information security tools to control access to shared resources of a single heterogeneous network // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 678. – P. 137–146.

A practical approach to the safe integration of various types of automated systems and information security tools to control user access to shared resources of a formed single heterogeneous network based on a service-oriented architecture with the implementation of a built-in access manager and intersystem interaction security adapters is presented.

Key words: computer security, information security, information protection means from unauthorized access, secure integration of various types of automated systems, service bus, access manager, intersystem interaction security adapters, information protection means integration agents, electronic signature.

Kompaniecs R.I., Lomako A.G., Harghevskaya A.V. A method for monitoring the integrity of calculations of computational tasks of automated military systems based on the verification of similarity invariants // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 678. – P. 147–162.

The paper proposes the solution to the scientific problem of verifying the correctness of program algorithms when distortions are arising during solving computational problems. The problem situation to be resolved is the need to ensure that the execution of computationally intensive task of military automated systems within the conditions of programmatic and mathematical influences is stable. The problem is deepened by inadequacy of currently used integrity control methods allowing to verify correctness of program algorithms in context of distortions and modifications of

calculations. It is essential that the developed approach for solving specified scientific problem allows to increase the efficiency of identifying patterns of distortions and modifications of the computational process and provide more stable calculation of the computationally intensive task of military automated systems under the conditions of distortions and modifications.

Key words: stability of computations, integrity control, patterns of distortions and modifications, invariant of similarity, computational process.

Podshibyakin A.S., Ushakov I.A., Shinkarenko A.F. Results of the analysis of the functioning of protection mechanisms in wireless data transmission networks // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 678. – P. 163–174.

The paper presents the results obtained using the developed software package for automated collection of authenticated data on wireless data transmission networks (BSPs) encapsulated in device certification algorithms based on protocols of the IEEE 802.11 group of standards.

Key words: Wi-Fi, wireless networks, getting access, software package, wireless data transmission networks, WPS, WPA/WPA2, information security.

Arseniev V.N., Petuhov A.B., Yadrenkin A.A. Evaluation of the stability characteristics of complex systems with the integration of the obtained data of the stages of testing, operation and application // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 678. – P. 175–180.

The problem of estimation of wear resistant characteristics of onboard equipment of the space vehicle by means of the integration of the information received before and after of natural tests of its prototypes is considered. The method is offered. It is considering the importance of the information, received on various stages of equipment researches, and allowing to raise quality of estimations of wear resistant characteristics. Unlike the majority of known methods, the approach is invariant to the aprioristic distribution law, and is simple enough for its use for estimation not only of the wear resistant characteristics, but also other characteristics of onboard equipment in case of the limited volumes of natural tests of prototypes.

Key words: the space vehicle, the onboard equipment, wear resistant characteristics, integration of the information.

Basotin E.V., Poliakov A.P., Shestopalova O.L. Justification of the modernization of the launch complex, taking into account the inadmissibility of reducing the efficiency of functioning // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 678. – P. 181–189.

An approach is proposed to substantiate the feasibility of modernizing the launch complex of the rocket and space complex based on predicting the residual period of obsolescence of technological equipment based on the criterion of an unacceptable decrease in operating efficiency during long-term operation. A model has been developed that describes the decrease in the efficiency of the operation of the launch complex technological equipment in time, taking into account the increase in the time spent on eliminating the failures of aging equipment, calculated ratios are obtained to determine the optimal level of equipment reliability according to the criterion of the maximum indicator of the functioning efficiency.

Key words: modernization, launch complex, obsolescence, operational efficiency, reliability.

Bashilov A.I., Okorokov M.V., Suchoruchenkov B.I. A method for evaluating the reliability of single-use technical systems based on the results of tests taking into account defects // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 678. – P. 190–202.

A method for assessing the dynamics of the probability of failure-free operation of single-use technical systems (TS) in the test process is justified, taking into account the identified and possible undetected defects. Dependencies are obtained for estimates of probabilities of the number of possible de-facts of HW not detected during tests.

Key words: a technical system of one-time use, possible defects, confidence in the absence of defects, assessment of failure-free performance indicators.

Usage of thermo-transformers in space rocket temperature control systems / S.N. Buyakov, A.M. Dzitoev, M.S. Dzitoev, A.V. Molostov // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 678. – P. 203–206.

The schematic diagram of a thermo-transformer and thermodynamic cycles which are realized in it are presented. Dependence of heat transformation coefficient on cooling coefficient of a refrigerating machine and thermal coefficient of efficiency of a heat engine is shown. Results of exergic analysis of thermal transformers in relation to heat pumps are presented. The area, in which application of thermal transformers operating in the heat pump mode is the most expedient, is revealed.

Key words: thermo-transformer, heat pump, heat source, cold source, thermo-stating system.

Vedernikov M.V., Il'inskiy A.V., Suyrcsov L.A. Physical modelling of jet flowing along curvilinear surface of radioparent dome // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 678. – P. 207–213.

An investigation of physical picture methodology about the distribution of single gas jet in a motionless gas medium during the transition from its free state into the relative motion to a concave curvilinear surface has been proposed. A physical picture of jet motion of a jet relative to a spherical surface at various flow formation schemes is described.

Key words: jet, spherical surface, angular boundaries of jet, nozzles.

Golovchinsky V.O., Mironenkov O.V. Questions of optimization of the composition of the instrument base of mobile laboratories for non-destructive testing of launch complexes // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 678. – P. 214–222.

The main methodological approaches to solving the problem of choosing the best alternative from the set of the same type of non-destructive testing means for the formation of the instrument base of mobile laboratories of launch complexes of rocket and space complexes are considered. It is shown that the solution to this problem can be a decision-making strategy in conditions of certainty based on an assessment of the weighted average indicators of criteria for the attractiveness of diagnostic equipment. The main criteria for assessing the quality of the same type of non-destructive testing tools are given. A method for calculating weight coefficients in multicriteria optimization problems has been proposed for practical use.

Key words: non-destructive testing means, mobile laboratory, quality assessment criteria, weight coefficients, ranking, Pareto set, optimization, alternative, expert solution.

Golyakov A.D., Richnyak A.M. Investigation of the accuracy and reliability of the autonomous navigation system of the spacecraft in the event of an astronomical sensor failure // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 678. – P. 223–232.

It is shown that it is possible in principle to determine all the parameters of the motion of the center of mass of the spacecraft by measuring the altitude of its flight above the Earth's surface and the zenith distance of the star, and the results of mathematical modeling are presented, which show

that with the help of algorithmic redundancy, there are conditions for ensuring the information reliability of the autonomous navigation system in the event of an astronomical sensor failure.

Key words: autonomous navigation system, spacecraft, astronomical sensor failure, accuracy of motion parameters determination, information reliability, algorithmic redundancy.

Zotkin M.U., Mironov V.I. An algorithm for stabilizing a small spacecraft when solving problems of observing an orbiting object // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 678. – P. 233–239.

An algorithm for stabilizing a small spacecraft (MCA) in solving problems of observing an orbiting object (OO) is presented, which takes into account the parameters for kinematic and dynamic parameters of angular motion. Numerical modeling was carried out, which showed that under the accepted design conditions, the MCA stabilization algorithm for solving the problems of observing the OO allows to increase the accuracy of the angular tracking of the OO by 1.5-2 times compared to the algorithm, which takes into account only the requirement for kinematic parameters at the end of the stabilization intervals.

Key words: small spacecraft, orbital object, stabilization, quaternions, the method of «multistep stabilization».

Ivashkov S.S. Simulated model of fighter-bomber flight dynamics for evaluation of limit mode limiter efficiency // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 678. – P. 240–249.

The article substantiates the need to create simulation models of aircraft flight dynamics. A simulation model of the dynamics of the flight of a fighter-bomber is presented, which takes into account the peculiarities of mechanical limiter of limit modes functioning, which allows conducting research in the field of evaluation of its operation efficiency. The main blocks of the model are described. The results of simulation modeling using the developed mathematical model are presented.

Key words: mathematical model; MATLAB & Simulink; limit modes limiter, pilotage stand, simulation.

2. *Kazakhov B.D., Kozlov V.V., Lagun A.V.* Methodology for assessing the level of influence of an external destructive factor on safety operation of a complex group object // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 678. – P. 250–262.

Studies of the assessment of the safe operation of a complex group object, the possibility of causing damage and destructive effects to the functioning of complexes by external destructive factors are carried out. The indicators of safe operation of the complex in the case of destructive impact are determined, and a method for assessing the level of safe operation of the complex in the case of possible destructive impacts is developed. With the help of this method, the possibility of choosing an effective appearance of a system that ensures the safe operation of a complex group object and solving the problem of ensuring the safe operation of complex group objects when exposed to external destructive influences without involving additional forces and structures is evaluated.

Key words: complex group object, structural element, indicator, system ensuring safe operation, destructive impact.

Method of classification of reflection spectra of materials and coatings of an object of rocket and space technology / V.V. Kakaev, S.V. Kulikov, D.S. Fedorenko, I.V. Chebotar // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 678. – P. 263–271.

The influence of identical materials simultaneously stored in a special database on the accuracy of quantitative interpretation of reflection spectra in the framework of monitoring space objects is analyzed. It is proposed to use a new classification of the reflection spectra of materials and coatings (according to the cross-correlation coefficient) and leave one material in each class of the generated database. The dependence of the identification performance on the threshold value of the correlation coefficient is shown.

Key words: correlation coefficient, reflection spectrum, space object, classification.

Kopkin E.V., Myshko V.V. Algorithm for sign selecting using a system of orthogonal vectors // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 678. – P. 272–283.

The article proposes a rather computationally simple algorithm that reduces the dimension of the initial sign space and significantly reduces the amount of diagnostic information processed in the process of evaluating the technical sign of an object.

Key words: technical state; sign; quasi-orthogonal matrices.

Krasnozhekov S.N., Polovnikov V.I. Calculation of the parameters of the space system from large and small spacecraft in low circular orbits // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 678. – P. 284–291.

A technique for calculating the parameters of a space system from large and small spacecraft in low circular orbits is presented. The space system under consideration is intended for observing the surface of the earth and the lower layers of near-earth space by small observation satellites and large spacecraft moving in low circular or near-circular orbits, with a minimum number of spacecraft in a system consisting of two planes.

Key words: small spacecraft, near-earth space, ground station for receiving information, command radio link, center for processing special information.

Krasnozhekov S.N., Polovnikov V.I. Optimal speed control in a dual-circuit tracking guidance system of an optoelectronic device // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 678. – P. 292–298.

The article is devoted to the description of the method of cluster launching of small spacecraft using a launch platform attached to a large-mass spacecraft, which is preliminarily launched by a launch vehicle into an intermediate circular near-earth orbit of a given height. The article consists of the following parts: a method of cluster launching of a small spacecraft from an intermediate circular orbit of a large-mass spacecraft, a description of the launch platform.

Key words: small spacecraft, large-mass spacecraft, breeding platform.

Kryzhanovskiy V.I., Slatov S.V., Trofimov I.A. Optimal speed control in a two-circuit tracking system for targeting an optoelectronic device // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 678. – P. 299–309.

The problem of forming the optimal speed control of a two-circuit tracking system for turning a turntable on which an optoelectronic device is located is considered. Pointing the optical axis of the optoelectronic device at the object of observation is performed by simultaneously turning the platform in azimuth and turning the optoelectronic device relative to the platform in height. The influence of cross-links between contours on the quality of processes under optimal control is studied.

Key words: optimal speed control, targeting, cross-link, two-circuit tracking system.

Lupashko M.N., Stepanov I.V., Timofeev V.V. Methodology for determining the frequency of use of spare elements of a military computing system // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 678. – P. 310–315.

The strategy of using elements of computer systems (processors, computational modules) in which the elements operate alternately for a certain specified time interval, is considered. The objective function that allows to estimate the optimal value for this interval from the point of view of reliability, is obtained. It is shown that with a decrease in the duration of the interval, the probability of failure-free operation of the computer system increases, however its increase has a pronounced maximum and decreases with an increase in the number of intervals.

Key words: computer system, reliability, replacement reservation, unloaded reserve, untime probability.

Onufriev V.V., Parshikov A.A., Sazonov S.Y. Calculation of the volt-ampere characteristic of a thermal emission converter taking into account the partial pressure of the impurity in the interelectrode gap // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 678. – P. 316–322.

In the course of operation of the thermionic converter (TEC), a significant amount of gas-forming impurities is formed in the impurity inter-electrode gap (TEC), which causes a significant amount of gas transfer in the inter-electrode gap. In this article, we propose a semi-empirical method for calculating the current-voltage characteristic (CVC) of an arc discharge with xenon. A modified method for calculating the I – V characteristic filled with a mixture of cesium vapor and an inert gas in the IES TPE has been developed. The I – V characteristics were calculated as a function of the partial pressure of xenon. The effect of the partial pressure of xenon on the TEC output voltage is shown.

Key words: thermionic energy converter, current-voltage characteristic, partial pressure, scattering cross-section, arc voltage losses.

Polovnikov V.I., Fadin I.A. An algorithm for determining the positions of a space object from an image containing its track // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 678. – P. 323–331.

Spacecraft growing significance results in space debris population increase that leads to spacecraft impact emergency increase. The solution of problem of space impact early warning is entrusted to automated system of space emergencies early warning (ASSEEW). This system started to operate in 2016 January the 1st. Creation of system of informational-analytical support (IAS) of space safety (SS) is considered to be the future of ASSEEW. The presence of spacecraft with optical equipment is distinctive feature of future system. Optical equipment functioning conditions are characterized by high angular dynamics of space object movement relative to measuring spacecraft. That high angular dynamics results in space object image blurring. The algorithm for calculation of space object positions on optical equipment shutter opening and closing moments is represented in this article.

Key words: space awareness, algorithm, image processing, coordinates.

Silantiev S.B. Launching spacecraft into geostationary orbit based on the use of universal robotic space platforms // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 678. – P. 332–340.

The article describes the conceptual provisions that determine the development directions of objects of rocket and space technology. Alternative ways of launching payloads to high orbits are considered. The results of evaluating the efficiency of launching a spacecraft from a low-orbit universal space platform to a geostationary orbit are presented.

Key words: spacecraft, multi-stage launch method, payload, upper stage, launch vehicle, launch vehicles, universal robotic space platform.

Boguk Y.M., Zuev A.S., Pyanusov A.V. Military-special games as a means of forming professional competencies of a military specialist // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 678. – P. 341–345.

The article presents the scientific and methodological substantiation of the role and place of the military special game in the system of training a military specialist in military educational institutions of higher education, its impact on the formation and assessment of military professional competence.

Key words: military special game, game training method, military professional competencies, military specialist, military educational institution of higher education.

Gnidko K.O., Makarov S.A., Nagornyi D.S. Support for decision-making on the introduction of special regimes in universities of the Ministry of Defense of the Russian Federation // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 678. – P. 346–354.

Abstract: the article presents the results of the development of an analytical model to support decision-making on the need to introduce self-isolation of students of higher educational institutions of the Ministry of Defense in a pandemic, as well as the results of an experimental study on the practical application of this model and solving the problem of determining the date of primary infection of a unit. The results obtained showed the practical usefulness of the developed approach, as well as algorithms and software components for identifying the structure of social ties in the training team, for supporting decision-making aimed at reducing the risks of sanogenic losses of personnel and maintaining the required quality of training in complex epidemiological conditions.

Key words: internal violator of information security, classification of network attacks, situation management, self-isolation, pandemic.

Danilyuk A.S., Medvedev V.M. The main directions of the formation of competencies of research activities of specialists in the field of information collection and processing by technical means // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 678. – P. 355–366.

The article analyzes the experience of training specialists in the field of information and processing by technical means on the example of the specialty 11.05.02 «Special radio engineering systems».

Key words: higher education, research, competence-based, approach, research work, basic educational program, federal state educational standard.

Kabalin V.L., Prischepa V.N., Severenko A.V. Improving the field training of cadets using the training complex «Tactical Training Field» // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 678. – P. 367–374.

In article the pedagogical experiment which purpose is improvement of a technique of training of cadets and improvement of quality of carrying out practical and classes in tactics on a subject matter «The general tactics» is considered; the indicators characterizing effectiveness and efficiency of activity of the commander at management of divisions in various conditions of a fighting situation are defined; initial level of readiness of students before the experiment and the reached level on its end is estimated; methodical recommendations about application in educational process of an educational complex No. 2 «Exercise tactical ground» are developed.

Key words: pedagogical experiment, training complex, simulator, skill, improving the effectiveness of training in tactical training.

Skvaznikov M.A., Cheburkov M.A. Assessment of the professional suitability of students in the specialty "Electronic and optoelectronic devices and systems for special purposes" // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 678. – P. 375–381.

The article analyzes the relationship between the results of experimental testing of candidates for training and the results of training of personnel (cadets) of the Academy in the academic disciplines of the main professional educational program in the specialty "Electronic and optoelectronic devices and special-purpose systems". The paper describes an electronic test to identify the professionally important qualities of specialists, and describes the method of conducting experimental testing of candidates.

Correlations between test results and training results for certain groups of disciplines were found to be of varying degrees of tightness. It is established that it is necessary to Refine the electronic test in terms of expanding the range of tested psychophysiological qualities necessary for studying the disciplines of specialization and the basic professional cycle.

Key words: professional psychological selection, professionally important qualities, correlation analysis, electronic test, tightness of ties, academic disciplines, main professional educational program, candidate.

Daneliyan A.P., Katcik V.O., Koksharov S.N. Methodology for assessing the level of readiness of officers of military units to perform tasks as part of a combat control group // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2021. – Release 678. – P. 382–388.

The article presents a methodology for assessing the level of readiness of officers of the main subdivisions of a military unit to perform tasks as part of a combat control group (GBU), the implementation of which will make it possible to carry out a scientifically based selection of trained officers of a military unit to perform special duties as part of various units of the GBU, create a reserve of officers for replacement, if necessary, the main staff of the GBU, as well as recommend to the attestation commission of the military unit the promotion of officers to higher command and staff positions and maintain an up-to-date database of officers to record their level of preparedness for the performance of special duties of officials of the GBU.

Key words: management, combat control group, officers, indicators of the level of preparedness of officers to perform special duties.

Абазина Евгения Сергеевна, доцент 35-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (911) 794-44-92, e-mail: vka@mil.ru

Аверкиев Николай Фёдорович, профессор 16-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-96-16, e-mail: averkiev@mail.ru

Алексеев Виктор Фёдорович, старший научный сотрудник 16-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-76, e-mail: vka-onr@mil.ru

Арсеньев Владимир Николаевич, профессор 25-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 262-02-22, e-mail: vladar56@mail.ru

Басотин Евгений Викторович, докторант 103-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 709-63-74, e-mail: vka@mil.ru

Башилов Александр Иванович, заместитель генерального директора АО «Корпорация «Московский институт теплотехники» по качеству» (127273, Россия, Москва, ул. Березовая аллея, 10); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (903) 219-44-54.

Бирюков Денис Николаевич, начальник 61-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-96-87, e-mail: biryukov.d.n@yandex.ru

Богачёв Сергей Алексеевич, доцент 16-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-96-16.

Богук Юрий Михайлович, профессор 71-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук, доцент; тел.: 8 (950) 016-07-01.

Бродский Максим Сергеевич, начальник 231-й лаборатории 23-го отдела 2-го управления Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (981) 983-96-63.

Бурлака Иван Михайлович, курсант 661/2-й учебной группы Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (914) 168-38-93, e-mail: byrlaka_ivan98@mail.ru

Буяков Сергей Николаевич, старший преподаватель 15-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (952) 370-25-32, e-mail: buysergej@yandex.ru

Ведерников Михаил Васильевич, доцент 15-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 242-55-26, e-mail: m-wedernikow@mail.ru

Власов Сергей Александрович, доцент 16-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-96-16.

Воробьев Алексей Максимович, курсант 661/12-й учебной группы Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (919) 210-09-20.

Гнидко Константин Олегович, профессор 65-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 237-19-60, e-mail: gnidko_ko@vka.loc

Головчинский Владимир Орестович, старший научный сотрудник 142-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (921) 581-97-09.

Голяков Алексей Дмитриевич, профессор 21-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-21.

Григорьев Андрей Николаевич, начальник 51-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-51, e-mail: Grig-AN@ya.ru

Данелян Александр Петрович, доцент 101-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук; тел.: 8 (812) 347-95-01.

Данилюк Андрей Степанович, доцент 24-й кафедры Военного университета радиоэлектроники (162608, Россия, Череповец, Советский пр., 126); кандидат военных наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-54.

Девяткин Александр Михайлович, начальник 6-го факультета Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-97-60, e-mail: lilaste@rambler.ru

Дзитоев Азамат Миронович, преподаватель 15-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (981) 146-71-60, e-mail: dzitoi8@gmail.com

Дзитоев Марат Сергеевич, преподаватель 14-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 766-01-43, e-mail: dzitoi8@gmail.com

Дудин Евгений Александрович, заместитель начальника 51-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-51, e-mail: dudinea@ya.ru

Еремеев Игорь Юрьевич, профессор 53-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-57.

Зайцев Владимир Валентинович, преподаватель 51-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-51, e-mail: zvv@mail.ru

Звонарёв Виталий Валерьевич, начальник 233-й лаборатории 23-го отдела 2-го управления Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (911) 254-58-70.

Зима Владимир Михайлович, профессор 61-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д.13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (921) 740-31-67, e-mail: vladimir_zima@mail.ru

Зоткин Максим Юрьевич, преподаватель 27-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-25.

Зувев Андрей Сергеевич, адъюнкт 73-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (931) 373-92-23.

Ивашков Сергей Сергеевич, адъюнкт 72-й кафедры ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394031, Россия, Воронеж, ул. Грамши, 74); тел.: 8 (906) 685-61-79, e-mail: ivashkov.sereja@yandex.ru

Ильинский Александр Вячеславович, инженер-исследователь факультета систем управления и радиотехники Университета ИТМО (197101, Россия, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49); кандидат технических наук; тел.: 8 (921) 889-73-12, e-mail: allil1003@mail.ru

Кабалин Владимир Львович, доцент 102-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-96-20.

Казахов Батраз Джумаевич, начальник 101-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор военных наук, профессор; тел.: 8 (951) 664-50-26.

Какаев Виталий Викторович, начальника управления Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор военных наук, доцент; тел.: 8 (995) 996-89-82.

Кацик Владимир Олегович, доцент 101-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-01.

Козлов Владимир Владимирович, профессор 14-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 215-00-23, e-mail: prof.kozlov@yandex.ru

Кокшаров Сергей Николаевич, старший преподаватель 101-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук; тел.: 8 (812) 347-95-01.

Колесников Денис Дмитриевич, доцент 71-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (951) 684-32-82, e-mail: vka@mil.ru

Компаниец Радион Иванович, преподаватель 61-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: (812) 347-96-87.

Комраков Дмитрий Николаевич, адъюнкт 51-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-51, e-mail: 070_503@mail.ru

Копкин Евгений Вениаминович, профессор 93-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (921) 961-13-38; e-mail: vka@mil.ru

Краснощеков Сергей Николаевич, старший научный сотрудник 113-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук, старший научный сотрудник; тел.: 8 (911) 220-77-81, e-mail: vka@mil.ru

Крыжановский Владимир Иванович; доцент 25-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; доцент; тел.: 8 (921) 310-66-37.

Крюков Роман Олегович, преподаватель 61-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (911) 003-73-83, e-mail: roman682@yandex.ru

Кубасов Игорь Юрьевич, заместитель начальника 16-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-96-16.

Кузьмичев Владимир Андреевич, адъюнкт 61-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (924) 414-71-02.

Куликов Сергей Валерьевич, заместитель начальника 83-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (952) 264-17-22.

Лагун Андрей Валерьевич, доцент 14-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 937-09-02.

Ломако Александр Григорьевич, профессор 61-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: (812) 347-96-87.

Лупашко Максим Николаевич, начальник 533-го военного представительства МО РФ (191124, Россия, Санкт-Петербург, пл. Растрелли, 2); тел.: 8 (905) 283-04-47, e-mail: Vka_24kaf@mil.ru

Макаров Сергей Александрович, старший помощник начальника отдела (организации научной работы и подготовки научно-педагогических кадров) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук; тел.: 8 (812) 237-19-60, e-mail: makarov_sa@vka.loc

Маковский Вячеслав Николаевич, доцент 101-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-56.

Марченко Максим Владимирович, слушатель офицерских курсов Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-99-84, e-mail: vka@mil.ru

Медведев Владимир Михайлович, профессор 55-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, профессор; тел.: 8 (921) 316-28-30.

Медяников Даниил Олегович, начальник 162-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (911) 965-57-56, e-mail: vka@mil.ru

Мироненков Олег Вячеславович, научный сотрудник 143-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат химических наук; тел.: 8 (961) 647-23-13.

Мионов Вячеслав Иванович, профессор 21-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-21.

Молостов Александр Валерьевич, адъюнкт 15-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13); тел.: 8 (911) 741-53-66, e-mail: 5801252@mail.ru

Мышко Василий Васильевич, доцент 93-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-65, e-mail: vka@mil.ru

Нагорный Дмитрий Сергеевич, преподаватель 65-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 237-19-60; e-mail: nagorniy_ds@vka.loc

Огороков Максим Владимирович, докторант кафедры баллистических ракет Военной академии РВСН имени Петра Великого (143900, Россия, Московская обл., Балашиха, ул. Карбышева, 8); кандидат технических наук; тел.: 8 (999) 873-02-20, e-mail: okorokovm00@mail.ru

Онуфриев Валерий Валентинович, профессор кафедры «Плазменные энергетические установки» МГТУ имени Н.Э. Баумана (125993, Россия, Москва, ул. Тверская, 11); доктор технических наук, доцент.

Панков Алексей Владимирович, старший преподаватель 65-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул.

Ждановская, 13); кандидат военных наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-96-34, e-mail: olgar2003@inbox.ru

Паршиков Антон Александрович, адъюнкт 91-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 822-83-89.

Петухов Анатолий Михайлович, преподаватель 101-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-94-31, e-mail: vka@mil.ru

Петухов Андрей Борисович, преподаватель 25-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (981) 790-94-39, e-mail: andrey_11_75@mail.ru

Пилькевич Сергей Владимирович, доцент 61-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук; тел.: 8 (911) 955-89-00, e-mail: ambers@list.ru

Подшибякин Александр Сергеевич, младший научный сотрудник 342-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-59.

Половников Виталий Иванович, старший научный сотрудник 152-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (981) 934-97-72, e-mail: vka@mil.ru

Поляков Алексей Прокопьевич, доцент 103-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-97-35, e-mail: vka@mil.ru

Попов Александр Сергеевич, старший научный сотрудник 231-й лаборатории 23-го отдела 2-го управления Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (961) 806-26-58.

Прищепа Владимир Николаевич, доцент 102-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук; тел.: 8 (812) 347-96-29

Пьянусов Александр Владимирович, начальник кафедры Санкт-Петербургского военного института войск национальной гвардии Российской Федерации (198264, Россия, Санкт-Петербург, ул. Лётчика Пилютова, 1В); кандидат военных наук; тел.: 8 (911) 249-57-80, e-mail: 89500160701b@gmail.com

Ричняк Александр Михайлович, доцент 21-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел. 8 (812) 347-95-21.

Рожков Виталий Валерьевич, адъюнкт 51-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-51, e-mail: randp@mail.ru

Сазонов Сергей Юрьевич, аспирант кафедры «Плазменные энергетические установки» МГТУ имени Н.Э. Баумана (125993, Россия, Москва, ул. Тверская, 11).

Салов Вячеслав Викторович, начальник 16-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-96-16, e-mail: kh_qqq@mail.ru

Сахно Игорь Викторович, начальник Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 210-08-82, e-mail: is_33@mail.ru

Северенко Александр Викторович, старший преподаватель 27-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-96-29.

Семенов Сергей Сергеевич, профессор кафедры безопасности связи Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного (194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр-т, 3); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (951) 683-16-89, e-mail: vas@mil.ru

Силантьев Сергей Борисович, доцент 21-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-21, e-mail: vka@mil.ru

Сквазников Михаил Алексеевич, доцент 51-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-51, e-mail: vka@mil.ru

Слатов Сергей Валерьевич, адъюнкт 25-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 767-55-31.

Смирнов Антон Николаевич, адъюнкт 55-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-56.

Степанов Игорь Викторович, помощник начальника учебно-методического отдела Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 223-86-59, e-mail: Vka_24kaf@mail.ru

Сухорученков Борис Иванович, профессор кафедры баллистических ракет Военной академии РВСН имени Петра Великого (143900, Россия, Московская обл., Балашиха, ул. Карбышева, 8); доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Российской инженерной академии; тел.: 8 (909) 979-25-14.

Сырцов Леонид Аркадьевич, доцент 15-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 917-40-69, e-mail: dzitoi8@gmail.com

Тимофеев Владимир Васильевич, преподаватель 24-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (952) 285-4206, e-mail: Vka_24kaf@mail.ru

Трофимов Илья Анатольевич, доцент 25-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (911) 163-12-99.

Ушаков Илья Алексеевич, начальник 342-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-97-59.

Фадин Илья Алексеевич, начальник 271-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 237-12-49, e-mail: vka@mil.ru

Федоренко Дмитрий Сергеевич, преподаватель 83-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел. 8 (999) 975-33-45.

Фёдоров Вадим Геннадиевич, преподаватель кафедры безопасности связи Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного (194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр-т, 3); тел.: 8 (951) 683-16-89, e-mail: vas@mil.ru

Фёдорова Светлана Викторовна, адъюнкт кафедры технического обеспечения связи и автоматизации Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного (194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр-т, 3); тел.: 8 (951) 683-15-85, e-mail: vas@mil.ru

Харжевская Александра Владимировна, начальник лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: (812) 347-91-59.

Хасанов Антон Юрьевич, начальник 161-й учебной лаборатории Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-16, e-mail: kh.www@yandex.ru

Чеботарь Игорь Владимирович, доцент кафедры Военного университета радиоэлектроники (162622, Россия, Череповец, Советский проспект, 126); доктор технических наук; тел.: 8 (952) 383-49-65.

Чебурков Михаил Александрович, преподаватель 51-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-51.

Шестопалова Ольга Львовна, декан филиала «Восход» ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (468320, Республика Казахстан, Байконур, ул. Ю. Гагарина, 5); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (33622) 5-14-43, e-mail: neman2004@mail.ru

Шинкаренко Антон Фёдорович, начальник 363-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-97-59.

Ядренкин Андрей Александрович, начальник 25-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (921) 599-68-33, e-mail: andrei_nikita@mail.ru

Ястребов Андрей Вячеславович, курсант 671/12-й учебной группы Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 101-66-41, e-mail: zxandroidxz@mail.ru

Абдурахимов Алексей Александрович, начальник 12-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, Россия, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-96-12, e-mail: vka@mail.ru

Авсеенко Александр Иванович, начальник 44-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (921) 752-29-59, e-mail: avseenko@mail.ru

Авсюкевич Дмитрий Алексеевич, старший преподаватель 43-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор.

Багрецов Сергей Алексеевич, старший научный сотрудник 61-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 779-86-94, e-mail: sergeibagrecov@bk.ru

Бирюков Денис Николаевич, начальник 61-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; e-mail: vka@mail.ru

Волков Валерий Фёдорович, профессор 91-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор военных наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-96-64, e-mail: vka@mail.ru

Голяков Алексей Дмитриевич, профессор 21-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-21

Гончаренко Владимир Анатольевич, профессор 24-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 242-01-19, e-mail: vlango@mail.ru

Горбулин Владимир Иванович, профессор 22-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 299-27-76, e-mail: v_gorbulin@mail.ru

Деев Владимир Викторович, профессор 93-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-65.

Доронин Александр Павлович, профессор 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 297-75-95, e-mail: doronin52@mail.ru

Какаев Виталий Викторович, заместитель начальника управления – начальник отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор военных наук; тел.: 8 (995) 996-89-82.

Козлов Владимир Владимирович, профессор 14-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 215-00-23, e-mail: prof.kozlov@yandex.ru

Косырев Сергей Викторович, профессор 104-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор военных наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-96-93.

Кужекин Николай Сергеевич, профессор 109-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13), кандидат философских наук, профессор; тел.: 8 (911) 794-16-72, e-mail: kns656@mail.ru

Кузнецов Александр Борисович, начальник 26-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-26.

Кунтурова Надежда Борисовна, профессор 111-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор педагогических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-96-31, e-mail: giz26@rambler.ru

Лебедев Евгений Леонидович, начальник 11-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; 8 (812) 347-95-11, e-mail: vka@mil.ru

Лоскутов Андрей Иванович, начальник 34-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (904) 551-24-91, e-mail: rujenx@mail.ru

Минаков Евгений Петрович, профессор 23-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 247-98-01, e-mail: ep.minakov12345@mail.ru

Мионов Андрей Николаевич, профессор 13-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-74, e-mail: mironov-anik@yandex.ru

Назаров Андрей Вячеславович, начальник 33-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор.

Новиков Владимир Александрович, профессор 101-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор военных наук, профессор, действительный член Академии военных наук; тел.: 8 (911) 200-44-95, e-mail: vka@mil.ru

Овчаров Владимир Александрович, начальник 31-го отдела – заместитель начальника управления Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук; тел.: 8 (812) 347-10-21, e-mail: vka@mil.ru

Пирогов Сергей Юрьевич, начальник 13-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-25, e-mail: pirogov205@mail.ru

Сазонов Константин Викторович, начальник 62-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-54, e-mail: vka@mil.ru

Салов Вячеслав Викторович, начальник 16-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-96-16, e-mail: kh_qqq@mail.ru

Силантьев Сергей Борисович, профессор 21-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-21.

Фоминов Иван Вячеславович, начальник 21-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-21.

Хрущ Роман Михайлович, профессор 74-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; e-mail: vka@mil.ru

Якимов Виктор Леонидович, доцент 34-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-99-34, e-mail: yakim78@yandex.ru