

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

Выпуск 671

2019 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 техн. 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;

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 РФ;*

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**, *кандидат техн. 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, проф.*; **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)

Ответственный за выпуск:
начальник РИО **С.В. Чернышев**
Выпускающий редактор: *А.В. Головина*
Техническое редактирование
и компьютерная верстка: *О.В. Филиппова*

Техническая поддержка:
Т.Н. Румянцева

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

Подписано к печ. 27.12.2019.
Формат печатного листа 445×300/4.
Уч.-печ. л. 117,00. Уч.-изд. л. 58,00
Тираж 50 экз. Заказ 3767/73.
Отпечатано в типографии
Военно-космической академии
имени А.Ф. Можайского

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

<i>Авксентьев А.А., Иванов А.А., Иванов А.О.</i> Моделирование обработки траекторных измерений на основе алгоритма последовательного сглаживания	8
<i>Басыров А.Г., Казанцев Д.И., Шушаков А.О.</i> Модель функционирования комплекса средств автоматизации на основе виртуализации вычислительных ресурсов с учетом характеристики рабочей нагрузки	15
<i>Закутаев А.А., Иванов А.О., Олейников М.И.</i> Математическая модель контроля ближней зоны околоземного космического пространства низкоорбитальным космическим аппаратом, оснащенным многоспектральным оптико-электронным комплексом	26
<i>Калюжный А.В., Максимов В.А., Шушаков А.О.</i> Модель функционирования гетерогенной бортовой системы хранения данных с учетом неоднородной информационной важности хранимых данных	33
<i>Малюгин А.В., Пилипенко Л.В., Хлебников С.Г.</i> Синтез рациональной структуры испытательных расчетов измерительного комплекса полигона	41
<i>Масалкин А.А., Павлов А.Н., Халиков Э.М., Чащин И.В.</i> Методика планирования применения системы спутникового радиоконтроля на основе рационального распределения ее технического ресурса	50
<i>Хабаров Р.С.</i> Метод оптимизации назначения смешанных приоритетов в сети массового обслуживания с многоканальными узлами	60
СВЯЗЬ, УПРАВЛЕНИЕ, НАВИГАЦИЯ И ВОЕННАЯ РАДИОЭЛЕКТРОНИКА	
<i>Абакумов А.Н., Еремеев И.Ю., Кадуков Е.П.</i> Модель радиосигналов с модуляцией с непрерывным изменением фазы зарубежных спутниковых систем связи в пространстве параметров фазовых диаграмм	71
<i>Алёшкин А.П., Зубарев К.К., Макаров А.А.</i> Применение мобильной радиоинтерферометрии в задаче координатно-временного обеспечения удаленных потребителей	80
<i>Алёшкин А.П., Владимиров В.В., Савочкин П.В.</i> Методика оценки влияния характеристик загоризонтной радиолокационной станции на результативность обнаружения наземной цели на фоне подстилающей поверхности	91
<i>Бакурский К.В., Мысливцев Т.О., Цыкунов В.Н.</i> Оценка интервалов наблюдения источников естественного космического радиоизлучения на борту космического аппарата	98

<i>Булекбаев Д.А., Лихачев В.М., Проданец В.А.</i> Дифракция электромагнитных волн на радиопрозрачных клиновидных телах в задачах прикладной электродинамики и радиолокации	103
<i>Бучинский Д.И., Паршуткин А.В.</i> Модель воздействия нестационарных помех на кадровую синхронизацию спутниковой системы связи	114
<i>Бучинский Д.И., Вознюк В.В., Фомин А.В.</i> Исследование помехоустойчивости приемника сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией к воздействию помех с различной структурой	120
<i>Лихачев В.М.</i> Дифракция электромагнитных поверхностных волн импедансных клиновидных телах в задачах радиолокации и радиосвязи	128
<i>Никитин Г.В., Старицин С.С., Шишкалов А.В.</i> Модель формирования протокольных блоков с пакетным мультиплексированием речевых данных абонентов ...	140
<i>Коцкович А.В., Суржиков В.Ф.</i> Оценка возможности навигационного определения параметров движения космических аппаратов при полете к Луне с помощью глобальных навигационных систем	151
СБОР И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ	
<i>Доронин А.П., Новиков А.В., Тимошук А.С.</i> Проблемные вопросы организации ведомственной сети экологического мониторинга Министерства обороны Российской Федерации	158
<i>Доронин А.П., Козлова Н.А., Петроченко В.М.</i> Оценки пригодности переохлажденной облачности к рассеянию над Центральным районом Европейской территории России в интересах решения прикладных задач	163
<i>Мамаев Ю.Н., Милосердов И.В., Овчаренко Л.А., Саркисян А.П.</i> Оценка возможностей комплексов пассивного радиомониторинга по обнаружению и определению координат воздушных целей, облучаемых сигналами импульсных радиолокационных станций	172
<i>Никитин Г.В., Шишкалов А.В.</i> Метод декомпозиции протокольных блоков с пакетным мультиплексированием речевых данных абонентов	182
<i>Чернов И.В.</i> Методика определения приборной поправки гиротеодолита с заданной точностью	192
РАЗРАБОТКА, ИСПЫТАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВООРУЖЕНИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ	
<i>Алимов Н.И., Власов В.А., Радионов Н.В., Яхваров Е.К.</i> Методика планирования материально-технического обеспечения войсковых частей космических войск с учетом нестабильности цен	201

<i>Аверкиев Н.Ф., Кульвиц А.В., Хасанов А.Ю.</i> Определение вероятностей столкновения космических аппаратов при их групповом выведении	210
<i>Александров М.А., Воложинский А.О., Минаков Е.П.</i> Модели оценивания прогнозной вероятности применения орбитальных группировок космических аппаратов землеобзора по пространственно-временным областям информационного обеспечения действий группировок сил флота	218
<i>Алексеев К.В., Лебедев Е.Л., Самойлов Н.С.</i> Применение акустико-эмиссионных средств для регистрации трещинообразования в конструкционном материале элементов вооружения, военной и специальной техники в условиях знакопеременной нагрузки	227
<i>Арсеньев В.Н., Балухев С.Ю., Белихин Е.Н.</i> Модель бортового оптико-электронного средства для исследования зависимости его погрешности от значений параметров	234
<i>Болдырев К.Б., Карчин А.Ю., Кубасов И.Ю., Сасункевич А.А.</i> Влияние сезонных факторов на высоту разрушения отделяющихся частей ракет-носителей на пассивном участке траектории	238
<i>Вивчарь Р.М., Пачин А.В., Решетников Д.В.</i> Оценивание влияния интенсивности запусков космических аппаратов военного назначения на параметры системы обеспечения готовности ракеты космического назначения к пуску	246
<i>Возмищев И.Ю., Клейменов В.В.</i> Определение ограничений применения лазерной опорной звезды, связанных с уровнем турбулентности атмосферы, при наблюдениях за космическими объектами	254
<i>Ворошилов И.В., Казимиров А.В., Молодова Ю.И., Молостов А.В., Прилуцкий А.И., Прилуцкий И.К.</i> Анализ рабочих процессов и оценка уровня механического КПД поршневых компрессоров с линейным приводом для систем газоснабжения и жизнеобеспечения объектов вооружения	259
<i>Гера В.И., Калмыков Е.В., Нестеров О.С.</i> Обоснование требований к основным характеристикам системы поддержания в готовности технических систем космических войск	280
<i>Головчинский В.О., Козлов В.В., Лагун А.В.</i> Координирование ресурсораспределения среди элементов ракетно-космического комплекса в задачах анализа нештатных ситуаций, возникающих при его эксплуатации	288
<i>Голиков И.О., Давидчук В.А., Лагун А.В., Садин Д.В.</i> Методика обоснования характеристик генераторов заградительных дисперсных образований от воздействия факторов различной физической природы	296
<i>Дорожко И.В., Копейка А.Л., Осипов Н.А.</i> Имитационная модель оценивания коэффициента готовности сложных технических комплексов с учетом показателей контроля и диагностирования технического состояния	303

<i>Карин А.И., Карин С.А., Октябрьский В.В.</i> Модели адаптивного управления функционированием систем комплексной обработки геопространственных данных при решении задач мониторинга территориально-распределенных объектов	314
<i>Кобзарев И.М., Копкин Е.В.</i> Использование меры ценности информации В.И. Корогодина для построения гибких диагностических процедур распознавания технического состояния бортовых систем космических аппаратов	326
<i>Копкин Е.В., Попов Н.А.</i> Системно-когнитивная модель определения технического состояния бортовой обеспечивающей системы космического аппарата	338
<i>Карагодин В.В., Рыбаков Д.В., Рыжый Н.В.</i> Применение частотного метода для исследования распределительных электрических сетей специальных объектов	349
<i>Мирошниченко А.В., Филатов А.В., Харебин Д.А.</i> Временная модель режимов функциональной эксплуатации сложных технических систем	356
<i>Лебедев Е.Л., Перфильев А.С., Султанов А.Э.</i> Анализ параметров вибрационного нагружения корпуса ракет-носителей как фактора повышения интенсивности выработки ресурса сварных соединений топливных баков	361
<i>Прокопенко Е.А., Шевченко А.В., Яшков С.А.</i> Верификация результатов численного моделирования силы лобового сопротивления гиперзвукового потока, действующей на элементы конструкции объектов ракетно-космической техники	368
<i>Тришункин В.В.</i> Модель совместного функционирования системы эксплуатации вооружения и системы заказов и поставок технических материальных средств космических войск	377
ПРОБЛЕМЫ ВОЕННОГО ОБРАЗОВАНИЯ, ВОИНСКОГО ОБУЧЕНИЯ И ВОСПИТАНИЯ, УПРАВЛЕНИЯ ПОВСЕДНЕВНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ ВОЙСК	
<i>Багрецов С.А., Черная Т.Э.</i> Методика определения необходимых условий изменения стратегий обучения (точек трансформации) при применении принципов трансформационной теории обучения	385
<i>Воронков И.Ю., Голубев М.А., Мерзвинская Л.В., Репях Н.А.</i> Методологические основы планирования деятельности военной образовательной организации в условиях внедрения электронной информационно-образовательной среды	393
<i>Дашкевич Я.В., Девяткин А.М., Панков А.В.</i> Метод рандомизации выборки, используемой при обучении нейросети в задачах профессиональной ориентации кандидатов для поступления в военный вуз	401

<i>Иноземцева Л.А., Кужекин Н.С.</i> Личностно-ориентированное обучение педагогических работников академии в ходе освоения программ профессиональной переподготовки и повышения квалификации	408
<i>Кацик В.О., Кокшаров С.Н.</i> Предложения по использованию видеоконференции на занятиях по оперативно-тактическим дисциплинам	413
<i>Кужекин Н.С., Мышко В.В., Чикуров В.А.</i> Модель формирования основной профессиональной образовательной программы высшего образования для укрупненной группы специальностей и направлений подготовки военных специалистов	417
ВОПРОСЫ ГУМАНИТАРНЫХ И ОБЩЕСТВЕННЫХ НАУК	
<i>Огородников В.П.</i> Информация, идеология и истина в структуре информационного противоборства	424
<i>Черкасова Е.М.</i> Обоснование механизма управления инновационной деятельностью в военных вузах России	430
Рефераты статей.....	438
Сведения об авторах.....	452
Сведения о рецензентах.....	463

А.А. Авксентьев,
кандидат техн. наук, доцент;
А.А. Иванов,
кандидат техн. наук;
А.О. Иванов,
кандидат техн. наук

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАБОТКИ ТРАЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО СГЛАЖИВАНИЯ

В статье предлагается один из вариантов алгоритма последовательного сглаживания измерений, который реализует процедуру фильтрации Калмана. Представлена разработанная авторами прикладная программа для моделирования измерений наблюдаемого параметра и их последующей обработки.

Ключевые слова: объект контроля, измеряемый параметр, последовательное сглаживание, фильтр Калмана.

ВВЕДЕНИЕ

При решении задачи оценки параметров движения космического объекта (КО) возможны различные подходы к статистической обработке данных измерений, изложенные в работе [1]. Простейшим алгоритмом предварительной обработки является алгоритм линейного усреднения. В соответствии с этим алгоритмом усредняется выборка из N значений $\hat{s}_i = \hat{s}(t_i)$, формируемых на выходе измерительного канала. Для сглаживания случайных ошибок измерений на больших интервалах усреднения без существенных динамических ошибок применяется полиномиальное усреднение, сущность которого состоит в представлении оцениваемого параметра \hat{s}_i на интервале усреднения $[t_H, t_K]$ в виде полиномиальной функции, степень которой определяется принятой моделью траектории движения объекта.

Указанным оценкам параметров траектории присущи следующие недостатки:

- в процессе оценки параметров необходимо хранить большое число результатов предыдущих измерений, что при одновременном обслуживании большого числа целей приводит к существенному увеличению требуемой емкости запоминающих устройств;
- каждая новая оценка параметров получается независимо от предыдущей, следовательно, точность оценки ограничена фиксированным числом используемых данных;
- имеет место задержка выдачи оценок параметров на начальном участке сопровождения, что не всегда является допустимым.

В связи с отмеченными недостатками метода оценки параметров при фиксированном объеме выборки возникает необходимость построения рекуррентного алгоритма, обеспечивающего последовательное (на каждом шаге) уточнение параметров траектории по результатам новых измерений.

АЛГОРИТМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО СГЛАЖИВАНИЯ ТРАЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Предлагается рассмотреть один из вариантов алгоритмов последовательного сглаживания измерений (s_n), который реализует процедуру фильтрации, предложенную Р. Калманом [2].

1. По результатам нескольких начальных измерений определяются оценки параметров КО \hat{s}_{n-1} , $\hat{\dot{s}}_{n-1}$, $\hat{\ddot{s}}_{n-1}$, которые на момент времени t_{n-1} образуют вектор сглаженных параметров траек-

тории КО \hat{v}_{n-1} . Формирование вектора производится по первым $n - 1 = 3$ измерениям следующим образом:

$$\hat{s}_3 = s_3; \quad \hat{\dot{s}}_3 = -\frac{1}{\Delta t} \left(\frac{s_3}{2} - 2s_2 + \frac{3s_1}{2} \right); \quad \hat{\ddot{s}}_3 = \frac{(s_3 - 2s_2 + s_1)}{\Delta t^2}.$$

При этом считаем, что элементы вектора измерений \hat{v}_{n-1} имеют нормальное распределение с математическим ожиданием, равным v_{n-1} , и корреляционной матрицей Ψ_{n-1} .

2. Экстраполяция полученных значений начальных оценок параметров траектории \hat{v}_{n-1} на момент времени t_n осуществляется с использованием полиномиального описания процесса изменения параметров в соответствии с выражениями:

$$\begin{aligned} \hat{s}_{n3} &= \hat{s}_{n-1} + \hat{\dot{s}}_{n-1}(t_n - t_{n-1}) + \hat{\ddot{s}}_{n-1} \frac{(t_n - t_{n-1})^2}{2!}, \\ \hat{\dot{s}}_{n3} &= \hat{\dot{s}}_{n-1} + \hat{\ddot{s}}_{n-1}(t_n - t_{n-1}), \quad \hat{\ddot{s}}_{n3} = \hat{\ddot{s}}_{n-1}, \end{aligned}$$

или в матричном виде, после введения в выражение оператора экстраполяции (F_3) оно примет вид

$$\hat{v}_{i3} = F_3 \hat{v}_{n-1}.$$

3. Вычисление ошибок экстраполированных значений осуществляется в соответствии с выражением

$$\Psi_{n3} = F_3 \Psi_{n-1} F_3^T,$$

при этом ошибки начальных оценок параметров траектории на момент времени t_{n-1} вычисляются следующим образом:

$$\Psi_3 = \left\| \begin{array}{ccc} 1 & -3/2\Delta t & 1/\Delta t^2 \\ -3/2\Delta t & 13/2\Delta t^2 & -6/2\Delta t^3 \\ 1/\Delta t^2 & -6/2\Delta t^3 & 6/2\Delta t^4 \end{array} \right\| \sigma^2.$$

4. Вычисление ошибок оценивания параметров траектории, учитывающее текущие измерения, осуществляется в соответствии с выражением

$$\Psi_n = \Psi_{n3} - \Psi_{n3} H^T (H \Psi_{n3} H^T + \sigma^2)^{-1} H \Psi_{n3},$$

где $H = [1 \ 0 \ 0]$ — линейный оператор.

5. Вычисление искомого вектора оценок параметров траектории космического объекта на текущий момент времени t_n осуществляется из следующего выражения:

$$\hat{v}_n = \hat{v}_{n3} + \Psi_n H^T \sigma^2 d_n,$$

где $d_n = (s_n - \hat{s}_{n3})$, невязка текущего измерения и его значения, полученного путем экстраполяции.

Недостатком приведенного метода оценки параметров траектории космических объектов является «расходимость» фильтра на длительных интервалах наблюдения. Для устранения указанного эффекта предлагается в алгоритме при расчете корреляционной матрицы ошибок экстраполяции искусственно увеличить полосу пропускания фильтра за счет введения «шума системы» Ψ_0 :

$$\Psi_{n3} = F_{n3} (\Psi_{n-1} + \Psi_0) F_{n3}^T.$$

Далее приведены результаты программной реализации алгоритма рекуррентной фильтрации.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОБРАБОТКИ ТРАЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

В качестве примера работы предложенного способа фильтрации было осуществлено моделирование процесса измерения радиальной скорости космического объекта $v(t)$, совершающего однократный маневр. Моделирование выполнено следующим образом. В качестве источника эталонных измерений радиальной скорости $v^*(t)$ выбрана функция, вид которой представлен на рис. 1.

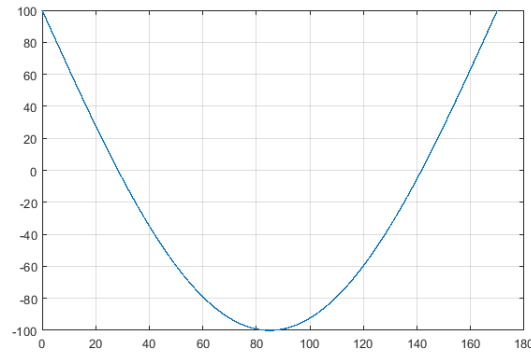


Рис. 1. График изменения наблюдаемого параметра динамического процесса $v^*(t)$

В момент времени $t_i = t_{\text{маневра}}$ моделировался маневр наблюдаемого объекта продолжительностью T , описываемый последовательностью $u(t)$ (рис. 2,а).

Далее с учетом предложенных вариантов маневра осуществлено моделирование зависимостей, характеризующих изменения эталонных измерений радиальной скорости $v(t) = v^*(t) + u(t)$ (рис. 2,б).

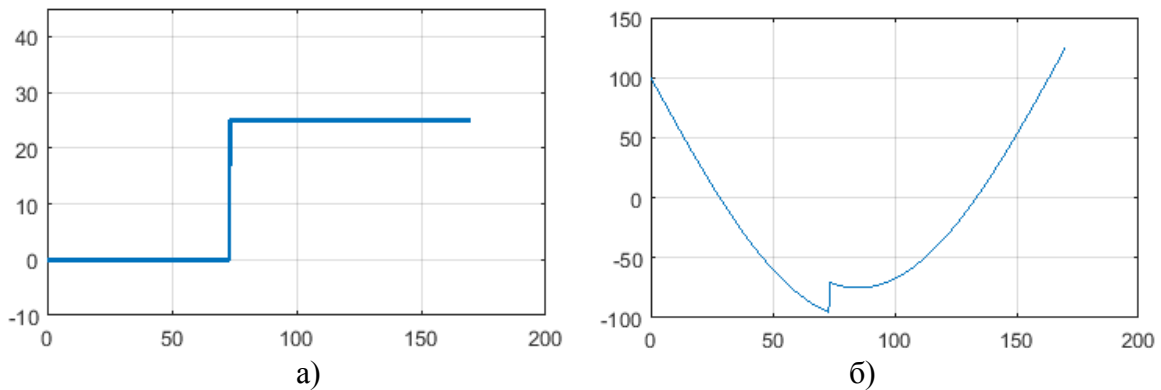


Рис. 2. Варианты скачкообразного изменения наблюдаемого параметра процесса: а – амплитуда скачка радиальной скорости; б – значения радиальной скорости наблюдаемого объекта

Моделирование измерений наблюдаемого объекта $\tilde{v}(t_i)$ проводилось путем зашумления параметра $v(t)$ (рис. 3).

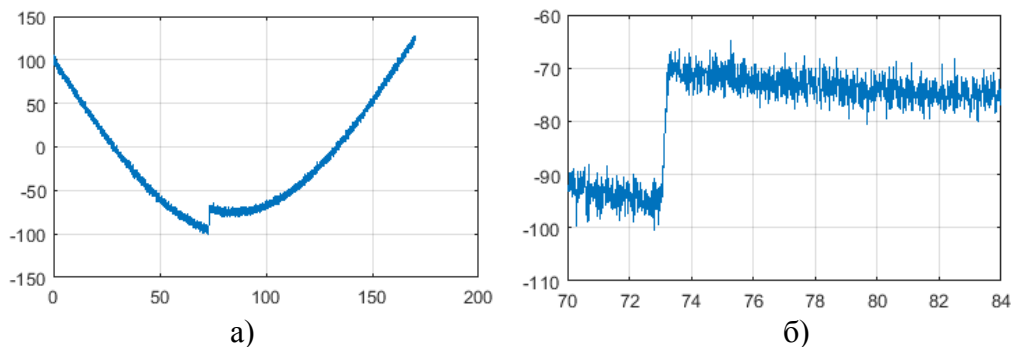


Рис. 3. Результаты моделирования измерений параметра $\tilde{v}(t_i)$:

а – общий вид; б – укрупненный вид

Использование алгоритма рекуррентной фильтрации измерений позволило получить оценки параметра $\hat{v}(t_i)$, (рис. 4), адекватные поведению измеряемого параметра.

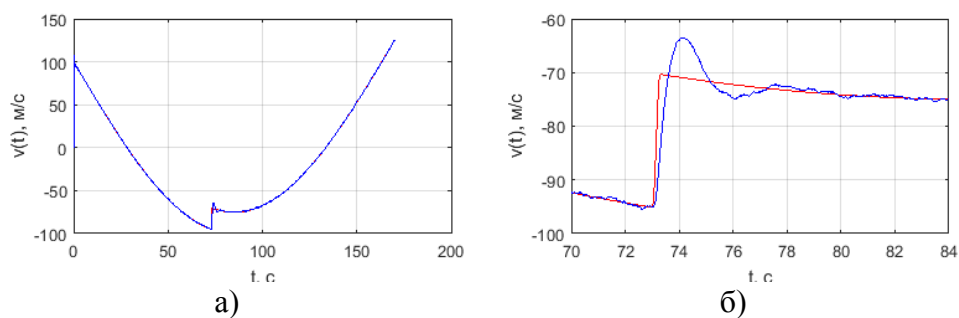


Рис. 4. Оценка значений измеренного параметра после сглаживания:

а – общий вид; б – укрупненный вид

Моделирование проводилось с использованием прикладной программы, разработанной в среде MATLAB. Главное окно программного комплекса представлено на рис. 5.

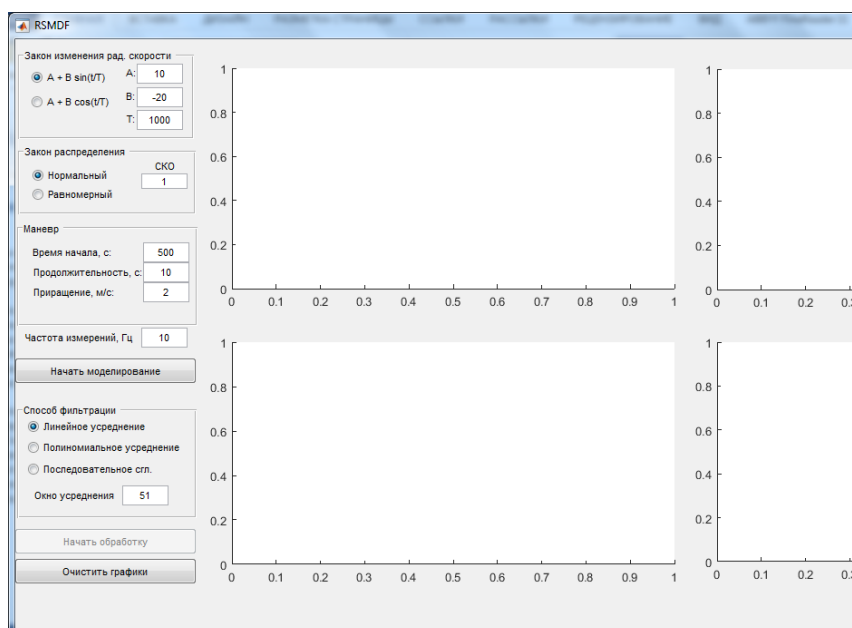
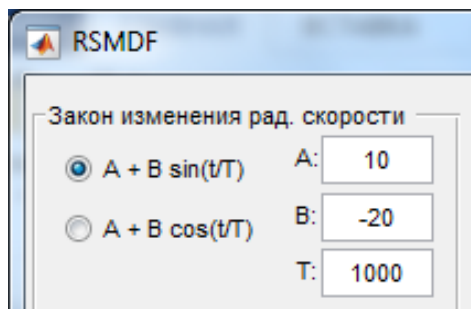


Рис. 5. Главное окно программного комплекса

Предварительная настройка прикладной программы включает в себя:

1. Ввод закона изменения радиальной скорости (рис. 6).



RS MDF

Закон изменения рад. скорости

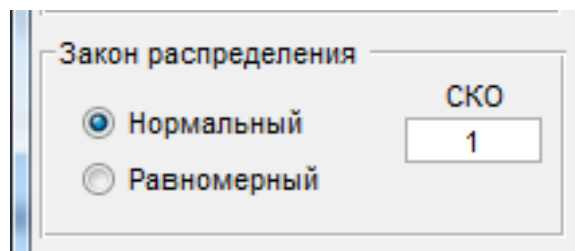
$A + B \sin(t/T)$ A: 10

$A + B \cos(t/T)$ B: -20

T: 1000

Рис. 6. Область ввода параметров закона изменения радиальной скорости

2. Выбор закона распределения ошибок измерений радиальной скорости: нормальный или равномерный, с указанием величины ошибки – СКО или диапазона отклонений (рис. 7).



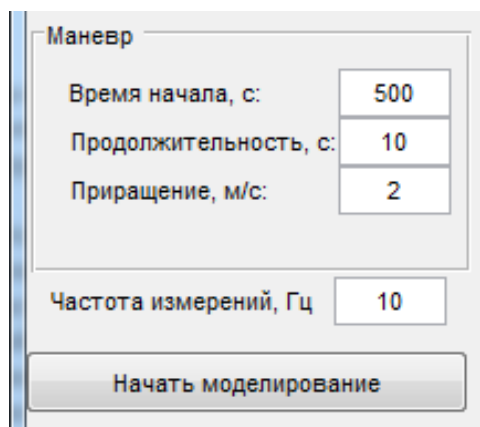
Закон распределения

Нормальный СКО 1

Равномерный

Рис. 7. Область ввода параметров ошибок измерений

3. Время начала, продолжительность и амплитуду маневра объекта наблюдений, частоту измерений (рис. 8).



Маневр

Время начала, с: 500

Продолжительность, с: 10

Приращение, м/с: 2

Частота измерений, Гц 10

Начать моделирование

Рис. 8. Область ввода параметров маневра и частоты измерений

В процессе работы прикладной программы осуществляются:

1. Моделирование измерений радиальной скорости с учетом ранее введенной СКО измерений (рис. 9).

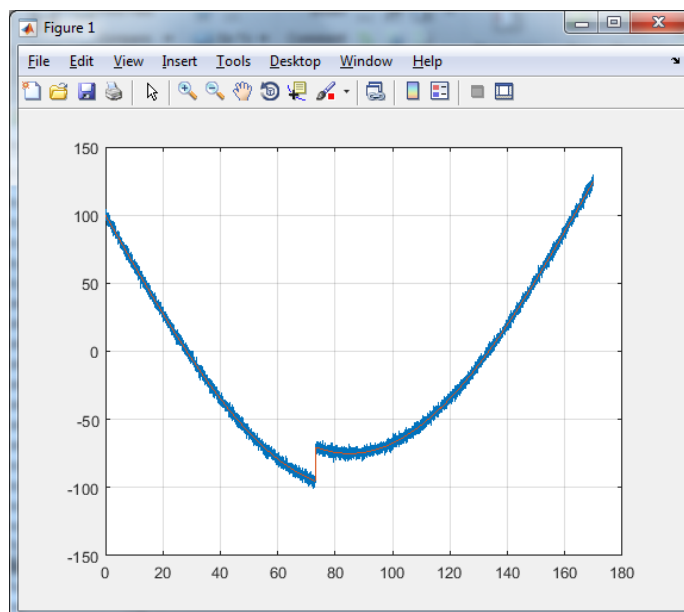


Рис. 9. Окно вывода результатов моделирования измерений

2. Фильтрация измеренных значений радиальной скорости и вычисление оценки радиальной скорости объекта на каждом шаге измерений (рис. 10).
3. Сохранение расчетов в текстовый файл для последующего анализа и обработки.

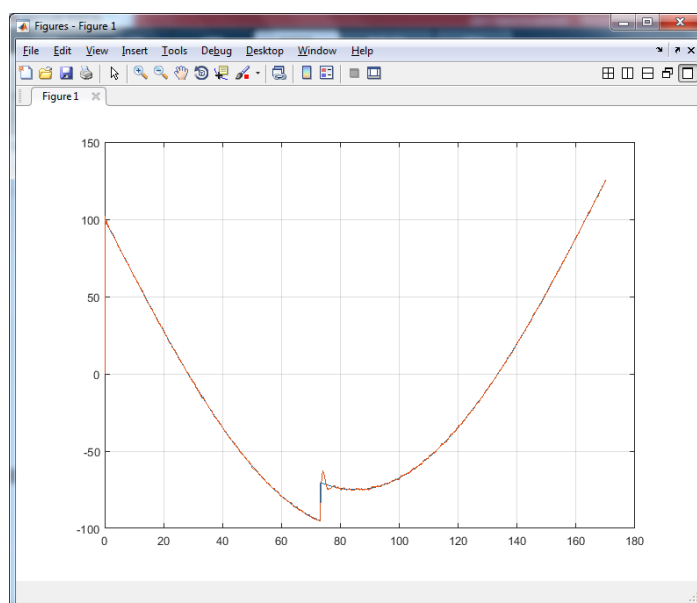


Рис. 10. Окно вывода результатов обработки измерений

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемая авторами прикладная программа позволяет проводить моделирование и сглаживание траекторных измерений тремя вышеописанными способами:

- линейным усреднением;
- полиномиальным усреднением;
- последовательным сглаживанием.

Программа позволяет сравнивать результаты фильтрации между собой с целью выбора наиболее эффективного подхода к обработке измерений в зависимости от начальных условий.

Программный код предлагаемого программного комплекса может быть транслирован на любые языки высокого уровня: C++, C#, Python, Delphi, Basic и т. д.

Основными преимуществами программного комплекса являются простота и наглядность процессов моделирования измерений и их обработки, возможность построения графиков по значениям каждого массива данных, используемых в расчетах.

Список используемых источников

1. *Кузьмин С.З.* Основы теории цифровой обработки радиолокационной информации. – М.: Сов. радио, 1974. – 432 с.
2. *Алёшкин А.П., Иванов А.А., Иванов А.О.* Способ обнаружения изменения режима функционирования космического объекта с использованием динамической фильтрации измеряемых параметров // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 661. – С. 107–113.

А.Г. Басыров,
доктор техн. наук, профессор;
Д.И. Казанцев;
А.О. Шушаков,
кандидат техн. наук

МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОМПЛЕКСА СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ ВИРТУАЛИЗАЦИИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ РЕСУРСОВ С УЧЕТОМ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАБОЧЕЙ НАГРУЗКИ

Рассмотрено функционирование сетевого комплекса средств автоматизации, обрабатывающего данные дистанционного зондирования Земли, поступающие с космических объектов на основе виртуализации вычислительных ресурсов. Проведено моделирование функционирования вычислительных систем в условиях использования виртуализации.

Сформированы предложения по повышению эффективности функционально-распределенной обработки данных. Приведен пример применения модели для расчета комплексного показателя эффективности функционирования вычислительной системы.

Ключевые слова: специальный комплекс средств автоматизации, виртуальная машина, конфигурирование виртуальной среды

ВВЕДЕНИЕ

Развитие космической отрасли [1] привело к увеличению объема обрабатываемых данных, поступающих с космических объектов на специальные комплексы средств автоматизации (СКСА). Своевременная обработка получаемых данных возможна при соответствующем техническом и программном обеспечении.

Объектом исследования является специальный комплекс средств автоматизации обработки данных, получаемых при дистанционном зондировании Земли (ДЗЗ). Анализ операционно-временной модели функционирования систем комплексной обработки геораспределенных данных [2] показал, что большую часть времени (до 70%) занимает процесс комплексной обработки информации, который принято разделять на два уровня: предварительная (первичная) обработка данных и тематическая обработка данных [3, 4].

Программно-алгоритмическая реализация обработки сопряжена с решением сложных научно-технических задач, имеющих свои особенности организации вычислительных и информационных процессов, связанных с достижением требуемой производительности СКСА в условиях ограниченных вычислительных ресурсов.

В работах [5–12] предложены подходы к решению задач автоматизированной комплексной обработки данных ДЗЗ на основе технологий виртуализации. При этом не достаточно внимания уделено учету трудоемкости и разнородности обрабатываемых заявок в сложной системе, работающей в режиме реального времени.

СПЕЦИАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ

Технологический цикл вычислительных и информационных процессов в общем виде представляет собой прием и обработку первичных и тематических данных. Для первичной обработки данных ДЗЗ важно обработать полученный информационный поток ДЗЗ (объемом до единиц Гбайт) в режиме реального времени либо с незначительной задержкой, чтобы

нормализация принятых данных произошла до следующего сеанса связи с космическим аппаратом (КА). Согласно [11] объем данных, формируемых при гиперспектральной съемке в пределах одного условного кадра может составить 0,4–5,3 Гбайта и более, при комплексном аэрокосмическом мониторинге – более 0,5 Тбайт/сутки [9, 10].

При обработке данных ДЗЗ с использованием технологий виртуализации предполагается предварительное развертывание в СКСА виртуальных машин. Заявки, поступающие на обработку данных ДЗЗ, могут быть двух видов: информационно-расчетные (первичная, вторичная обработка) и обеспечивающие (задачи, связанные с управлением вычислительных ресурсов). Особенности функционирования программного обеспечения для задач первичной/вторичной обработки выходят за рамки настоящей статьи. Предполагается, что работа программного обеспечения для задач первичной/вторичной обработки достаточно автоматизирована. Далее под заявками, если не указано дополнительно, будем понимать заявки на обработку данных ДЗЗ.

В состав СКСА, функционирующего на основе технологии виртуализации, могут входить автоматизированные рабочие места пользователей, вычислительные системы (серверы, системы хранения данных), виртуальные машины, программное обеспечение, каналы связи, системы администрирования и управления.

Схема организации процесса обработки заявок на виртуальных машинах (VM) в общем виде представлена на рис. 1.

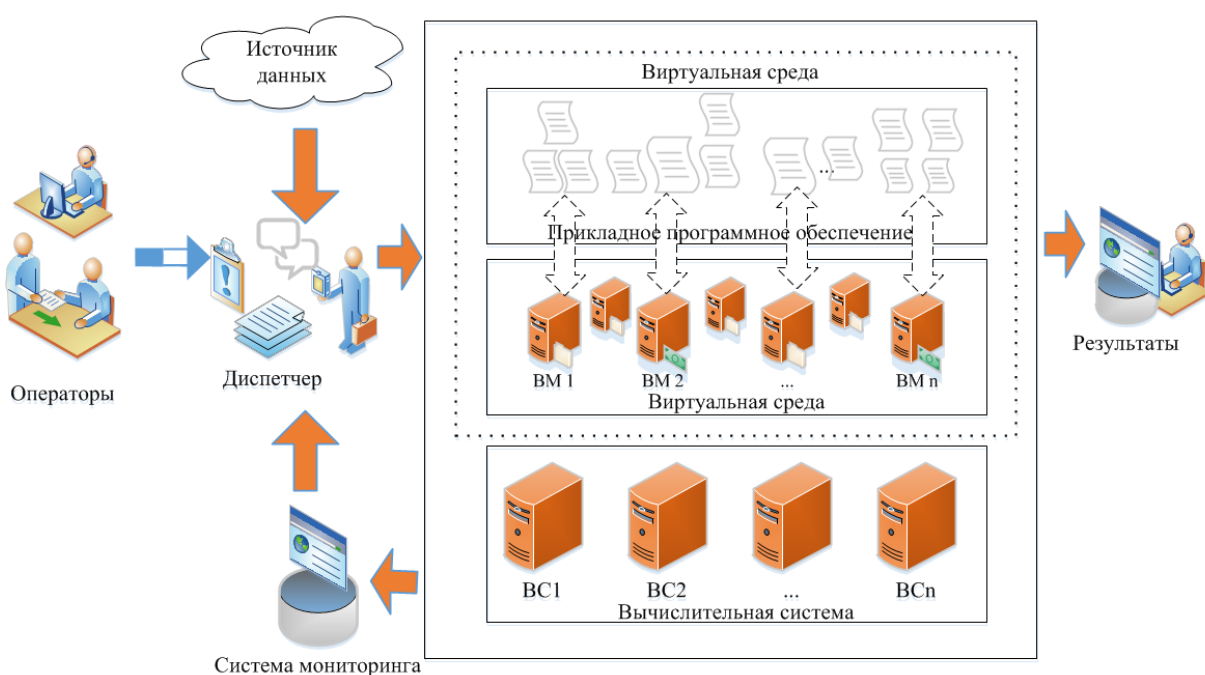


Рис. 1. Схема организации процесса обработки данных ДЗЗ

Источником данных являются КА ДЗЗ. Специальная информация с этих аппаратов через соответствующие средства приема и первичной обработки поступает в СКСА, организованный на основе параллельной вычислительной системы.

Вычислительная система – это совокупность ЭВМ (серверов), на которой под управлением гипервизора могут функционировать несколько виртуальных машин. В зависимости от количества типов заявок, требований по надежности и производительности функционирования СКСА, ограничений на ресурс памяти создаются конфигурации виртуальных машин с необходимым программным обеспечением.

Виртуальная машина представляет собой программный контейнер, связывающий, или «инкапсулирующий», полный комплект виртуальных аппаратных ресурсов, а также операционную систему и все ее приложения в программном пакете [13].

Прикладное программное обеспечение – совокупность компьютерных программ, обеспечивающих обработку заявок на решение прикладных задач – задач обработки данных ДЗЗ.

Система мониторинга – инструмент сбора и обработки данных о состоянии объектов инфраструктуры [14]. Система мониторинга дает информацию диспетчеру о состоянии аппаратной и виртуальной среды, показателях качества решения целевых задач.

Диспетчер используется для управления информационно-вычислительными процессами (реконфигурирование виртуальных машин, распределение поступающих заявок по вычислительным системам (ВС), в зависимости от типа поступающих заявок и трудоемкости решаемых задач, обеспечение отказоустойчивости ВС); содержит планировщик задач, обеспечивающий планирование нагрузки между хостами.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ КОНФИГУРИРОВАНИЯ ВИРТУАЛЬНОЙ СРЕДЫ КОМПЛЕКСА СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ

Представленная на рис. 1 схема организации процесса обработки данных ДЗЗ предполагает использование вычислительной системы, состоящей из многопроцессорных компьютеров (серверов), предварительного развертывания на каждом из них некоторого количества виртуальных машин, на каждой из которых установлено общее и определенное прикладное программное обеспечение (ПО) для обработки информации ДЗЗ.

Опишем процесс функционирования вычислительной системы следующим образом. На каждом сервере ВС развернуто несколько типов виртуальных машин. Каждый тип ВМ различается составом установленного на ней программного обеспечения. ВС может функционировать в следующих режимах:

1) режиме высокой производительности – поступающие в систему заявки на решение задач распределяются между всеми серверами, параллельно выполняющими соответствующие программы обработки заявок;

2) режиме высокой надежности – поступающие в систему заявки на решение каждого типа задач дублируются на все сервера и запускают соответствующие программы обработки заявок;

3) смешанном режиме – все сервера объединяются в группы; каждая группа серверов функционирует либо в режиме высокой производительности, либо в режиме высокой надежности.

Вербальная постановка задачи. По заданным характеристикам потока обслуживаемых неоднородных заявок на обработку данных ДЗЗ определить оптимальный вариант конфигурации виртуальной среды СКСА, обеспечивающий максимальную производительность функционирования СКСА (интенсивность обслуживания заявок в единицу времени) при заданных ограничениях на ресурсоемкость и надежность СКСА.

Под *конфигурацией* виртуальной среды будем понимать распределение виртуальных машин (ВМ) с установленным на них прикладным ПО, обслуживающим заявки, по физическим серверам.

В основу исследования положена гипотеза о влиянии характеристик потока заявок, характеристик вычислительной системы, конфигурации виртуальной среды, надежности прикладного ПО на производительность и надежность функционирования вычислительных систем СКСА.

Для решения поставленной задачи рассмотрена и исследована модель функционирования виртуальной среды на основе многопроцессорных вычислительных систем, в которой организована многопоточная обработка аэрокосмических данных.

Общая постановка задачи. В соответствии с выдвинутой гипотезой формализуем зависимости показателей производительности s и надежности p функционирования вычислительной системы от характеристик G ВС (количество вычислительных машин, количество ядер в процессорах, объем оперативной памяти), характеристик Z потока заявок, конфигурации K виртуальной среды, характеристик L (надежности, времени выполнения, требуемого объема памяти) прикладного ПО в виде

$$s = s(Z, G, L, K),$$

$$p = p(Z, G, L, K).$$

Характеристики G ВС зададим множеством $G = \{k, \mu\}$, где k – количество физических серверов в системе, μ – объем оперативной памяти сервера.

Характеристики Z потока заявок зададим множеством $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_g\}$, где z_i – интенсивность потока заявок за решение i -й задачи (запуска i -го приложения).

Конфигурацию K виртуальной среды зададим множеством $K = \{K_M, K_P\}$, где $K_\alpha = \|\alpha_{ij}\|_{k \times m}$ – матрица назначения ВМ m типов на k физических серверов, $\alpha_{ij} \in \{0, 1\}$; $K_\beta = \|\beta_{ij}\|_{m \times g}$ – матрица назначения g программ на m ВМ, $\beta_{ij} \in \{0, 1\}$.

Характеристики L программного обеспечения зададим вектором $C = \langle c_1, c_2, \dots, c_g \rangle$, где $c_i = \{\lambda_i, t_i, v_i\}$ – характеристика i -го ПО, включающая его интенсивность λ_i потока отказов, среднее время t_i выполнения программы по i -й заявке, v_i – потребная емкость оперативной памяти.

В зависимости от выбора целевой функции и принятых ограничений, может быть сформулировано несколько постановок задач. Практический интерес представляют следующие постановки, связанные с поиском конфигураций виртуальной среды – размещения копий программ по виртуальным машинам и виртуальных машин по серверам.

1. Найти оптимальную конфигурацию виртуальной среды СКСА, обеспечивающую максимальную производительность СКСА при ограничениях на надежность функционирования СКСА и имеющийся объем памяти.

2. Найти оптимальную конфигурацию виртуальной среды СКСА, обеспечивающую максимальную надежность функционирования СКСА при требовании обработки всех поступающих заявок при ограниченном объеме памяти.

3. Минимизировать количество серверов и найти оптимальную конфигурацию виртуальной среды СКСА, обеспечивающих обработку всех поступающих заявок с заданной надежностью при ограниченном объеме памяти.

4. Обосновать количество серверов и требуемый объем их памяти для обработки всех поступающих заявок с заданной надежностью.

Математическую задачу первого типа можно сформулировать следующим образом.

Дано: характеристика G ВС, характеристика Z потока заявок, характеристика L ПО.

Найти: допустимый вариант конфигурации K^* виртуальной вычислительной среды, обеспечивающий достижение максимума номинальной производительности системы:

$$K^* = \arg \max_{k^* \in K} s(Z, G, C, K). \quad (1)$$

Ограничения:

1) на надежность функционирования системы:

$$p(Z, G, C, K^*) \geq p_{\text{тр}}, \quad (2)$$

где $p_{\text{тр}}$ – требуемая вероятность обработки заявки каждого типа;

2) на объем оперативной памяти серверов:

$$v(G, C, K^*) \geq v_{\text{доп}}, \quad (3)$$

где $v_{\text{доп}}$ – допустимый объем оперативной памяти серверов;

3) на состав и распределение ВМ по серверам, предполагающие выполнение копии каждого ПО хотя бы одной ВМ, размещенной хотя бы на одном сервере:

$$\sum_{i=1}^m \left(\beta_{ij} \cdot \sum_{l=1}^k \alpha_{li} \right) \geq 1, \quad \forall j = 1, \dots, g. \quad (4)$$

Искомая конфигурация k^* представляет собой совокупность двух массивов K_α и K_β (табл. 1) значений α_{ij} , $i = 1, \dots, k$, $j = 1, \dots, m$ и β_{ij} , $i = 1, \dots, m$, $j = 1, \dots, g$ соответственно, которые обеспечивают максимум выражения (1) при выполнении ограничений (2)–(4).

Таблица 1

Формальное представление конфигурации виртуальной среды

K_α				
ВМ	1	2	...	m
сервер 1	α_{11}	α_{12}	...	α_{1m}
сервер 2	α_{21}	α_{22}	...	α_{2m}
...
сервер k	α_{k1}	α_{k2}	...	α_{km}

K_β				
ПО	1	2	...	g
ВМ 1	β_{11}	β_{12}	...	β_{1g}
ВМ 2	β_{21}	β_{22}	...	β_{2g}
...
ВМ m	β_{m1}	β_{m2}	...	β_{mg}

$\alpha_{ij} \in \{0, 1\}$ $\beta_{ij} \in \{0, 1\}$

МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОМПЛЕКСА СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ

Модель функционирования комплекса средств автоматизации включает отмеченные в постановке задачи зависимости производительности (1), надежности (2) функционирования СКСА, а также требуемого объема памяти (3) от характеристик ВС, потока заявок, ПО и конфигурации виртуальной среды с учетом ограничения (4) на возможность обслуживания заявок всех типов. Рассмотрим эти зависимости.

Надежность функционирования СКСА. Надежность функционирования СКСА оценим вероятностью обслуживания заявки каждого типа. Этот показатель зависит от времени бесперебойной работы виртуальной среды СКСА.

Для оценивания времени бесперебойной работы виртуальной среды СКСА используем известное распределение Пуассона [15], позволяющее оценить вероятность P возникновения c отказов объекта за период T :

$$P(c, T) = \frac{(LT)^c}{c!} e^{-LT},$$

где L – интенсивность потока отказов объекта.

Пусть после возникновения отказа одной из копий ПО, установленной на j -й ВМ, за время τ_j^B система мониторинга обнаруживает отказ, а диспетчер перегружает виртуальную машину (восстанавливает ее функционирование). Таким образом, простой ВМ после каждого сбоя составит τ_j^B .

Время τ_j^B перезагрузки (простоя) j -й ВМ зависит от количества установленных на ВМ программ, объема памяти, которые они используют, времени загрузки операционной системы. Это время составляет

$$\tau_j^B = \delta_1 v_0 + \delta_2 \sum_{r=1}^g \beta_{jr} + \delta_3 \sum_{r=1}^g \beta_{jr} v_r, \quad (5)$$

где $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ – коэффициенты, определяемые экспериментально;
 v_0 – объем памяти для системного ПО ВМ;
 v_r – объем памяти для прикладного ПО ВМ, обслуживающего заявку r -го типа.

Так как отказ любого ПО, установленного на ВМ, приводит к необходимости ее перезагрузки (к восстановлению), интенсивность L_j потока отказов j -й ВМ определим как сумму интенсивностей потоков отказов отдельных копий ПО:

$$L_j = \sum_{r=1}^g \lambda_r \cdot \beta_{jr}. \quad (6)$$

Среднее время γ_j восстановления j -й ВМ составит

$$\gamma_j = \tau_j^B \cdot \sum_{c=0}^{\infty} c \cdot P(c, T) = \tau_j^B \cdot \sum_{c=1}^{\infty} \frac{(L_j \cdot T)^c}{(c-1)!} e^{-L_j \cdot T}, \quad (7)$$

где L_i – интенсивность потока отказов i -й ВМ (5).

Определим вероятность p_{ji} того, что заявка r -го типа поступит для обслуживания на j -ю ВМ в момент времени, когда эта ВМ не находится в состоянии восстановления:

$$p_{rj} = 1 - \frac{\gamma_j}{T}.$$

Это выражение по сути является коэффициентом готовности ВМ [17].

Тогда, с учетом возможности размещения копии r -го ПО одновременно на нескольких ВМ, вероятность p_r обслуживания поступившей заявки r -го типа в виртуальной среде составит

$$p_r = 1 - \prod_{j=1}^m \varphi\left(\frac{\gamma_j}{T}, \beta_{jr}\right),$$

где $\varphi(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{если } y = 0, \\ x, & \text{если } y = 1. \end{cases}$

Соответственно, вероятность $p(r, k)$ обслуживания поступившей заявки r -го типа в виртуальной среде всех k серверов

$$p(r, k) = 1 - \prod_{j=1}^m \left(\varphi\left(\frac{\gamma_j}{T}, \beta_{jr}\right)^{\sum_{l=1}^k \alpha_{lj}} \right), \quad (8)$$

Для выполнения требования (2) по надежности функционирования системы значение $p(j, k)$ в выражении (8) должно быть больше, чем $p_{\text{тр}}$ для всех $j = 1, \dots, g$ типов ПО.

Производительность СКСА. Производительность СКСА определяется средней долей ω обслуженных заявок, поступивших за заданный период времени. В качестве показателя ω

производительности СКСА на заданном периоде функционирования будем использовать величину

$$\omega = \frac{1}{T \cdot g} \sum_{r=1}^g \frac{\tau_r^p}{z_r \cdot t_r}, \quad (9)$$

- где τ_r^p – процессорное время, выделяемое на обслуживание заявок r -го типа за период;
 T – величина периода времени;
 z_r – интенсивность поступления заявок r -го типа;
 t_r – время, необходимое на обработку заявки r -го типа;
 g – количество типов заявок.

Величина τ_r^p зависит от следующих факторов:

- количества копий программы, одновременно обслуживающих заявки r -го типа;
- времени выполнения программ обслуживания заявок;
- количества серверов (процессоров), выполняющих программы;
- загруженности процессоров выполнением других программ;
- состояния (исправности) серверов и ВМ, на которых выполняются программы.

Время τ_{ijr}^{BM} , выделяемое i -м сервером r -му ПО, установленному на j -й виртуальной машине за период времени T без учета простоя (восстановления) ВМ, составляет

$$\tau_{ijr}^{BM} = \frac{T \cdot (1 - \eta_j) \cdot \alpha_{ij} \cdot \beta_{jr}}{\sum_{l=1}^m \alpha_{il} \sum_{l=1}^g \beta_{jl}}.$$

Здесь η_j – доля процессорного времени, выделяемая на работу программного обеспечения j -й ВМ. Если учитывать среднее время, затрачиваемое ВМ на восстановление (6), то «чистое» время τ_{ijr}^p , выделяемое i -м сервером j -й виртуальной машине для работы r -го ПО за период времени T , составит

$$\tau_{ijr}^p = \tau_{ijr}^{BM} - \gamma_j = \alpha_{ij} \cdot \beta_{jr} \cdot \left(\frac{T \cdot (1 - \eta_j)}{\sum_{l=1}^m \alpha_{il} \sum_{l=1}^g \beta_{jl}} - \tau_j^B \cdot \sum_{c=1}^{\infty} \frac{(L_j \cdot T)^c}{(c-1)!} e^{-L_j \cdot T} \right),$$

где $L_j = \sum_{l=1}^g \lambda_l \cdot \beta_{jl}$. Тогда «чистое» время τ_{ir}^p , выделяемое i -м сервером для работы r -го ПО на всех виртуальных машинах, функционирующих на нем, за период времени T составит

$$\tau_{ir}^p = \sum_{j=1}^m (\tau_{ijr}^{BM} - \gamma_j) = \sum_{j=1}^m \alpha_{ij} \cdot \beta_{jr} \cdot \left(\frac{T \cdot (1 - \eta_j)}{\sum_{l=1}^m \alpha_{il} \sum_{l=1}^g \beta_{jl}} - \tau_j^B \cdot \sum_{c=1}^{\infty} \frac{(L_j \cdot T)^c}{(c-1)!} e^{-L_j \cdot T} \right).$$

И наконец, «чистое» время τ_r^p , выделяемое *всеми* серверами для работы r -го ПО на *всех* виртуальных машинах, за период времени T составит

$$\tau_r^p = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m (\tau_{ijr}^{\text{BM}} - \gamma_j) = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m \alpha_{ij} \cdot \beta_{jr} \cdot \left(\frac{T \cdot (1 - \eta_j)}{\sum_{l=1}^m \alpha_{il} \sum_{l=1}^g \beta_{jl}} - \tau_j^{\text{B}} \cdot \sum_{c=1}^{\infty} \frac{(L_j \cdot T)^c}{(c-1)!} e^{-L_j T} \right), \quad (10)$$

где $L_j = \sum_{l=1}^g \lambda_l \cdot \beta_{jl}$, а τ_j^{B} определяется выражением (5).

Подставив в соотношение (9) значение τ_r^p из выражения (10) и произведя преобразования, получим среднюю долю обслуженных заявок

$$\omega = \frac{1}{g} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m \alpha_{ij} \cdot \zeta \left(\sum_{l=1}^g \beta_{jl} \right) \cdot \left(\frac{(1 - \eta_j) \cdot \sum_{r=1}^g \beta_{jr}}{\left(\sum_{l=1}^m \alpha_{il} \right) \left(\sum_{l=1}^g \beta_{jl} \right)} - \tau_j^{\text{B}} \cdot \sum_{c=1}^{\infty} \frac{L_j^c \cdot T^{c-1}}{(c-1)!} e^{-L_j T} \right), \quad (11)$$

где $\zeta(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } x > 0, \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$.

Затраты памяти на функционирование СКСА. Потребный объем оперативной памяти i -го сервера

$$v(G, k^*) = v(\alpha_{ij}, \beta_{jb}) = v + \sum_{j=1}^m \alpha_{ij} \cdot \left(v_0 + \sum_{r=1}^g \beta_{jr} \cdot v_r \right), \quad (12)$$

где $i = 1, \dots, k$; $j = 1, \dots, m$. В формуле (12) введены следующие обозначения:

- k – количество серверов СКСА;
- m – количество виртуальных машин;
- g – количество типов ПО (приложений), запускаемых по заявкам пользователей;
- v – объем памяти для общего системного и прикладного ПО сервера;
- v_0 – объем памяти для системного ПО ВМ;
- v_r – объем памяти для прикладного ПО ВМ, обслуживающего заявку r -го типа.

Математическая постановка задачи (1)–(4) с учетом принятой модели может быть сформулирована как оптимизационная задача

$$K^* = \arg \max_{K^* \in \{K_\alpha, K_\beta\}} (\omega(K))$$

поиска конфигурации $K^* = \{K_\alpha^*, K_\beta^*\} = \left\{ \left| \alpha_{ij} \right|_{k \times m}^*, \left| \beta_{ij} \right|_{m \times g}^* \right\}$, обеспечивающей максимум целевой функции (11) при ограничениях:

$$1 - \prod_{j=1}^m \left(\varphi \left(\frac{\gamma_j}{T}, \beta_{jr} \right) \right)_{l=1}^k \sum_{l=1}^k \alpha_{lj} \geq p_{mp}, \forall r = 1, \dots, g,$$

$$v + \sum_{j=1}^m \alpha_{ij} \cdot \left(v_0 + \sum_{r=1}^g \beta_{jr} \cdot v_r \right) \leq v_{don}, \quad \forall i = 1, \dots, k,$$

$$\sum_{j=1}^m \left(\beta_{jr} \cdot \sum_{l=1}^k \alpha_{lj} \right) \geq 1, \quad \forall r = 1, \dots, g.$$

Задача является NP-полной и относится к классу задач нелинейного булева программирования.

ПРИМЕР КОНФИГУРИРОВАНИЯ ВИРТУАЛЬНОЙ СРЕДЫ КОМПЛЕКСА СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ

В качестве примера конфигурирования виртуальной среды комплекса средств автоматизации рассмотрим результат моделирования функционирования СКСА в различных конфигурациях виртуальной среды и выбора оптимальной из них.

Параметры моделирования приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры моделирования функционирования СКСА

Параметр моделирования	Значение
Период функционирования СКСА	24 часа
Количество серверов (k)	2
Количество типов заявок (g)	4
Интенсивность поступления заявки	20/час
Время обслуживания заявки	1 мин
Интенсивность потока отказов прикладного ПО	0,01 /час
Требуемая вероятность успешного обслуживания заявок	0.95
Объем памяти прикладного ПО	1 Гб
Объем памяти для ПО ВМ	2 Гб
Объем памяти для ПО сервера	3 Гб
Ограничение на объем используемой памяти сервера	40 Гб

Конфигурацию K виртуальной среды комплекса, представляющую собой совокупность двух бинарных матриц: $|\alpha_{ij}|$ размерностью $k \times m$ и $|\beta_{ij}|$ размерностью $m \times g$, где k – количество серверов, m – количество виртуальных машин, g – количество типов заявок и соответствующих им программ, можно представить двумя кодами:

$$Y_{\alpha}(k, m) = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m \alpha_{ij} \cdot 2^{ij-1} \quad \text{и} \quad Y_{\beta}(m, g) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^g \beta_{ij} \cdot 2^{ij-1}.$$

В табл. 3 приведены лучшие конфигурации виртуальной среды функционирования СКСА для различного числа виртуальных машин.

При заданных ограничениях (табл. 2) оптимальным является вариант виртуальной среды на четырех виртуальных машинах с конфигурацией, указанной в последней строке табл. 3.

Таблица 3

Выбор оптимальной конфигурации виртуальной среды функционирования СКСА

Количество ВМ	ω	Конфигурация	
		$Y_{\alpha}(k, m)$	$Y_{\beta}(m, g)$
1	0.9957	3 (2,1)	15 (1,4)
2	1.0686	15(2,2)	60 (2,4)
3	1.0869	15(2,3)	300 (3,4)
4	1.1039	146(2,4)	29619 (4,4)

Дальнейшее наращивание числа виртуальных машин не дает увеличения производительности ввиду ограничений на затраты памяти.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренная модель функционирования комплекса средств автоматизации на основе виртуализации вычислительных ресурсов учитывает характеристики рабочей нагрузки, состав и характеристики вычислительных средств СКСА. Модель позволяет оценить производительность, надежность и затраты памяти СКСА в зависимости от выбранной конфигурации виртуальной среды. Это обеспечивает решение ряда практических задач по обоснованию выбора состава и характеристик вычислительных средств, оцениванию показателей качества его функционирования и выработке рекомендаций по конфигурированию виртуальной среды.

Отметим, что решение последней задачи при большой размерности исходных данных (количестве виртуальных машин и типов заявок, больших шести) является нетривиальной проблемой и требует разработки приближенных алгоритмов оптимизации.

Список используемых источников

1. Современные методы интеллектуальной обработки данных ДЗЗ / Н.С. Абрамов, Д.А. Макаров, А.А. Талалаев, В.П. Фраленко // Программные системы: теория и приложения. – 2018. – № 4(39). – С. 417–442.
2. Карин С.А. Операционно-временная модель функционирования систем комплексной обработки геопространственных данных в условиях дефицита их ресурсов // Информационно-управляющие системы. – 2017. – № 2(87). – С. 51–57.
3. Бондур В.А. Современные подходы к обработке больших потоков гиперспектральной и многоспектральной аэрокосмической информации // Исследование Земли из космоса. – 2014. – № 1. – С. 3–17.
4. Водолазкина Н.А. Перспективы использования технологий виртуализации // Инновационная наука. – Уфа, 2015. – № 6. – С. 45–48.
5. Коуров А.В. Современные гипервизоры как основа инфраструктуры образовательной организации // Вестник Шадринского гос. педагог. ин-та. – 2015. – № 1 (25). – С. 142–148.
6. Конфигурирование вычислительных систем на основе виртуализации ресурсов / А.Г. Басыров, Д.И. Казанцев, А.А. Карытко, Н.А. Шаменков // Известия Тульского гос. ун-та. – 2017. – № 12. – С. 331–345.
7. Методика расчета оптимального числа узлов кластера виртуализации частного облака виртуальных рабочих столов по критерию эффективности / А.Е. Аверьянихин, А.В. Котель-

ницкий, К.А. Муравьев // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – №5–3(47). – С. 6–13.

8. *Алпатов А.Н.* Оценка влияния системных параметров распределенного вычислительного комплекса на эффективность работы алгоритмов балансировки нагрузки // Кибернетика и программирование. – 2017. – № 1. – С. 1–10.

9. *Парфёнов Д.И.* Исследование распределения ресурсов в интерактивных сервисах инфокоммуникационных сетей: дис. канд. техн. наук: 05.12.13 / Поволжская государственная академия телекоммуникаций и информатики. – Самара, 2014.

10. *Игнатова Н.А.* Методы и алгоритмы оптимизации ресурсного обеспечения сложных информационно-вычислительных систем на железнодорожном транспорте: дис. канд. техн. наук: 05.13.01 / Московский государственный университет путей сообщения МГУПС (МИИТ). – М., 2014.

11. Сравнение различных подходов к распределению ресурсов в центрах обработки данных / П.М. Вдовин, И.А. Зотов и др. // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2014. – № 5. – С. 71–83.

12. *Зотов И.А., Костенко В.А.* Алгоритм распределения ресурсов в центрах обработки данных с единым планировщиком для различных типов ресурсов // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2015. – № 1. – С. 61–71.

13. *Басыров А.Г., Казанцев Д.И.* Методика распределения прикладных задач по виртуальным машинам с учетом надежности их решения // Известия ВУЗов. Приборостроение. – 2016. – № 10. – Т. 59. – С. 822–827.

14. *Белая Т.И., Забузов В.С., Казанцев Д.И.* Способ организации контроля качества обслуживания в инфотелекоммуникационной сети на примере ВКА имени А.Ф. Можайского // Научный обозреватель. – 2014. – № 12. – С. 56–57.

15. *Гмурман В.Е.* Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие для вузов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1977. – 479 с.

А.А. Закутаев;
А.О. Иванов,
кандидат техн. наук;
М.И. Олейников,
кандидат техн. наук

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОНТРОЛЯ БЛИЖНЕЙ ЗОНЫ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА НИЗКООРБИТАЛЬНЫМ КОСМИЧЕСКИМ АППАРАТОМ, ОСНАЩЕННЫМ МНОГОСПЕКТРАЛЬНЫМ ОПТИКО- ЭЛЕКТРОННЫМ КОМПЛЕКСОМ

Проведен анализ условий наблюдения космических объектов в видимом и инфракрасном диапазонах длин волн оптико-электронной аппаратурой низкоорбитального космического аппарата наблюдения за космической обстановкой и способов их учета. Разработана математическая модель контроля ближней зоны околоземного космического пространства низкоорбитальным космическим аппаратом, оснащенный многоспектральным оптико-электронным комплексом, с учетом приоритета вариантов наблюдения космических объектов.

Ключевые слова: космический аппарат, многоспектральная оптико-электронная аппаратура, производительность наблюдений.

ВВЕДЕНИЕ

Основой модуля целевой аппаратуры (МЦА) низкоорбитального космического аппарата наблюдения за космической обстановкой (КА-наблюдателя) является оптико-электронная аппаратура (ОЭА), обеспечивающая получение информации о низкоорбитальных космических объектах (КО) в видимом и инфракрасном (ИК) спектральных диапазонах [1]. Одним из показателей эффективности функционирования КА-наблюдателя является производительность его оптико-электронного комплекса (ОЭК). Под производительностью ОЭК понимается отношение суммарного времени получения им информации о КО к общему времени его функционирования. Она зависит от угла поля зрения ОЭК, а также дальности получения информации о КО требуемого качества. Поскольку в процессе функционирования КА-наблюдателя фоноцелевая обстановка и количество объектов, по которым потенциально может быть проведен сеанс наблюдения, будут постоянно меняться, то производительность его ОЭК может варьироваться в значительных пределах в зависимости от приоритета выбора как объекта наблюдения, так и качества получаемой о нем информации. Информация о зависимости производительности от характеристик ОЭК КА-наблюдателя является необходимой при обосновании его тактико-технических характеристик. Таким образом, разработка математической модели контроля ближней зоны околоземного космического пространства низкоорбитальным КА, оснащенный многоспектральным ОЭК, с учетом приоритета вариантов наблюдения КО является актуальной задачей.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И ДОПУЩЕНИЯ

Назначением математической модели является расчет производительности ОЭК, которая определяется его техническими возможностями с учетом особенностей условий наблюдения, учитывающих относительные положения КА-наблюдателя и КО в околоземном космическом пространстве (ОКП), их относительное перемещение и условия освещенности. Значение производительности ОЭК может быть рассчитано в соответствии с выражением

$$Q_{\text{контр}}(w, l_{\text{изобр}}, l_{\text{VIS обн}}, l_{\text{MWIR обн}}, l_{\text{LWIR обн}}) = \frac{\sum_{i=1}^n t_{\text{VIS } i} + \sum_{j=1}^m t_{\text{MWIR } j} + \sum_{k=1}^h t_{\text{LWIR } k}}{3qt_{\text{набл}}}, \quad (1)$$

где $t_{\text{VIS } i}$, $t_{\text{MWIR } j}$, $t_{\text{LWIR } k}$, n , m , h – продолжительность и количество интервалов времени получения информации о КО в видимом, среднем и дальнем ИК диапазонах соответственно;

$t_{\text{набл}}$ – общее время функционирования КА-наблюдателя;

w – значение угла поля зрения ОЭК;

$l_{\text{изобр}}$ – дальности получения детальных изображений КО с требуемым линейным разрешением;

q – количество наблюдаемых КО;

$l_{\text{VIS обн}}$, $l_{\text{MWIR обн}}$, $l_{\text{LWIR обн}}$ – значения дальности обнаружения КО в видимом, среднем и дальнем ИК диапазонах соответственно.

При моделировании было принято допущение о том, что значения углов поля зрения каждого из спектральных каналов в составе ОЭК равны, а значение дальности получения детальных изображений КО приравнивается к значению дальности, обеспечиваемой в канале дальнего ИК диапазона.

Приоритет возможных вариантов наблюдения определяется в соответствии с табл. 1.

Таблица 1

Распределение приоритетов возможных вариантов наблюдения КО

Дальность до КО	$\leq l_{\text{изобр}}$			$l_{\text{изобр}} \leq l_i \leq l_{i \text{ обн}}$		
	+	+	–	+	+	–
Видимый диапазон	+	+	–	+	+	–
Средний ИК диапазон	+	–	+	+	–	+
Дальний ИК диапазон	+	–	+	+	–	+
Приоритет	1	2	2	3	5	4

Исходя из анализа выражения (1), расчет производительности ОЭК сводится к определению таких интервалов времени, на которых соблюдались бы следующие условия наблюдения:

– КО должен находиться в зоне прямой видимости ОЭК КА-наблюдателя;

– ориентация визирной оси ОЭК КА-наблюдателя должна исключать возможность засветки излучением от Солнца и Луны;

Для канала видимого диапазона дополнительными условиями наблюдения являются:

– КО должен быть освещен Солнцем;

– фазовый угол освещенности КО Солнцем должен быть достаточным для обеспечения возможности его наблюдения.

Указанные условия и способы их учета достаточно подробно описаны в работах [2–5].

Дополнительным условием наблюдения для каналов ИК диапазона является отсутствие засветки ОЭК излучением от Земли [6]. Под засветкой понимается ситуация, при которой Земля попадает в поле зрения ОЭК. Таким образом, для интервалов времени, на которых будет отсутствовать засветка, должно выполняться следующее условие: текущий угол обзора w_i должен быть меньше минимального значения w_{min} (рис. 1).

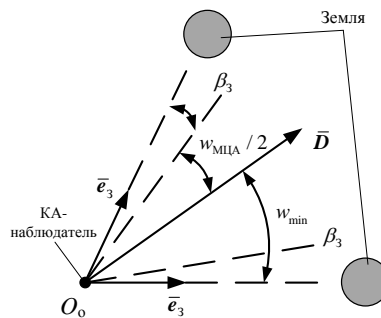


Рис. 1. Схематическое представление для определения условий засветки ОЭК Землей:
 \bar{D} – вектор наклонной дальности, характеризующий направление линии визирования ОЭК;
 $w_{\text{МЦА}}$ – угол поля зрения ОЭК; β_3 – значение половины углового размера Земли;
 \bar{e}_3 – векторы наклонной дальности, характеризующие направления на центр Земли

Исходя из анализа рис. 1, значение минимального угла обзора для Земли $w_{3\text{min}}$ может быть рассчитано в соответствии с выражением

$$w_{3\text{min}} = \frac{w_{\text{МЦА}}}{2} + \beta_3.$$

Значение углового размера Земли будет зависеть от высоты орбиты КА-наблюдателя.

Поскольку функция косинуса на интервале $[0, \pi]$ является убывающей, то значение критического угла, исключающего попадание Земли в поле зрения ОЭК, для каждого момента времени может быть вычислено по формуле

$$\varphi_3 = w_3 - w_{3\text{min}},$$

где w_3 – угол между направлением на Землю и направлением линии визирования ОЭК, который находится по формуле

$$w_3 = \arccos \frac{\bar{D} \cdot \bar{e}_3}{|\bar{D}|}.$$

Засветка, возникающая при попадании Земли в поле зрения ОЭК будет отсутствовать при значениях угла $\varphi_3 \geq 0$.

СТРУКТУРА И ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Для расчета производительности ОЭК в зависимости от значений угла поля зрения ОЭК и дальностей получения информации о КО требуемого качества, с учетом вышерассмотренных условий наблюдения, была разработана математическая модель, структура которой представлена на рис. 2.

Исходными данными для моделирования являются:

- параметры орбиты КА-наблюдателя;
- параметры орбит наблюдаемых КО;
- значение угла поля зрения ОЭК и дальности, на которой обеспечивается получение информации о КО в дальнем ИК диапазоне требуемого качества;
- интервал времени, на котором осуществляется расчет производительности КА-наблюдателя.

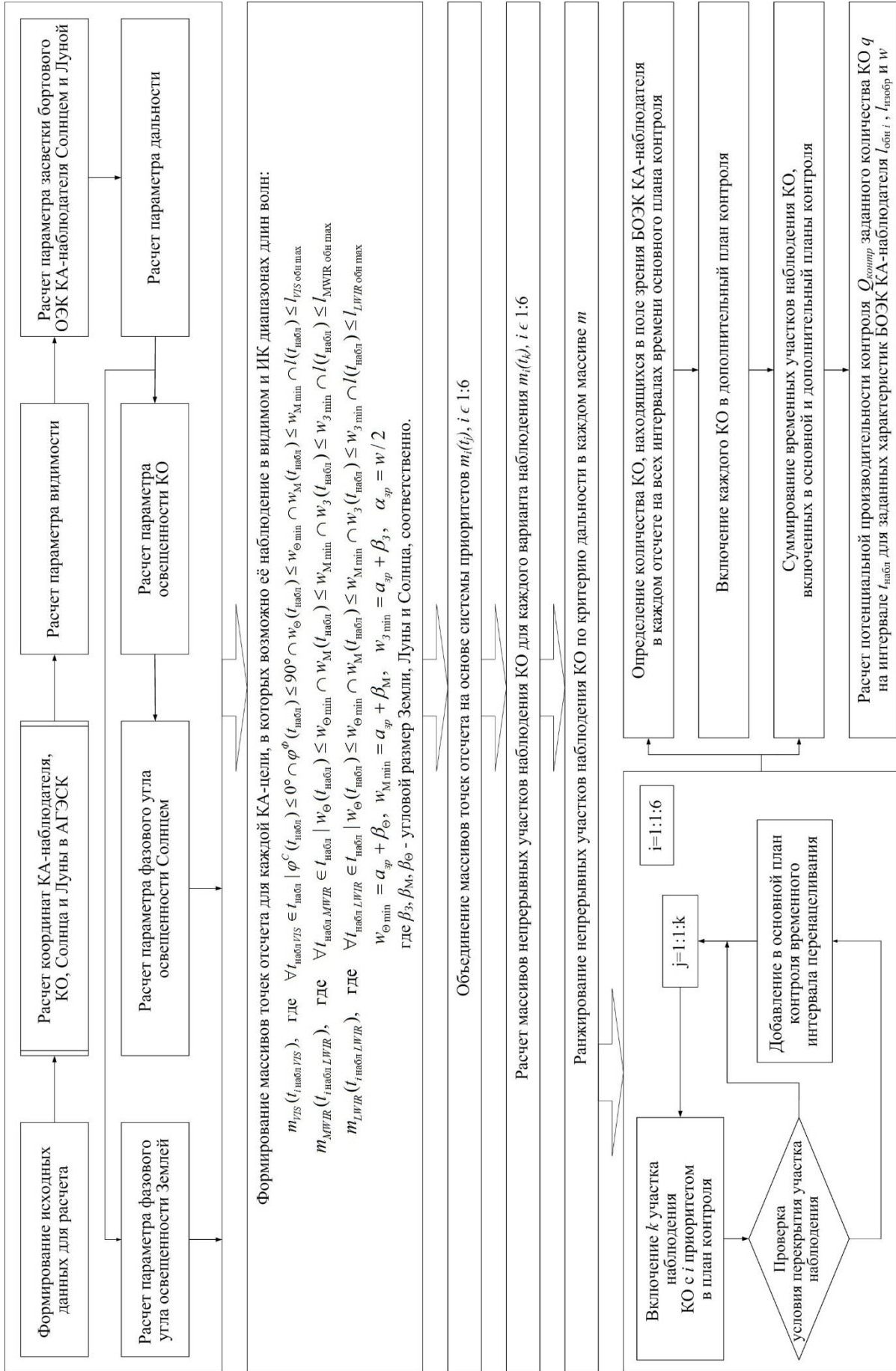


Рис. 2. Структурно-логическая схема модели

При разработке модели были приняты следующие допущения:

- отражательно-излучательные характеристики и габаритные размеры КО позволяют ОЭК КА-наблюдателя получать информацию о них в видимом диапазоне требуемого качества на дальностях, соответствующих максимальному значению дальности наблюдения объектов на низких орбитах с высотами не более 1000 км [2];
- ранжирование интервалов наблюдения за КО осуществляется на основе приоритета по их длительности;
- в случае нахождения в поле зрения ОЭК нескольких КО производится учет интервала времени наблюдения только того КО, который находится в центре поля зрения ОЭК;
- влияние «смаза» изображения, возникающего в процессе наблюдения КО, не учитывается;
- учет времени перенацеливания ОЭК во всех случаях принимается равным 90 с.

Процесс моделирования состоит из следующих этапов.

На *первом этапе* в соответствии с [7] рассчитываются массивы координат КА-наблюдателя, Солнца, Луны и всех КО в АГЭСК на заданном интервале времени с дискретностью в 20 с.

На *втором этапе* для всех временных отсчетов производится проверка условий возможности наблюдения ОЭК КА-наблюдателя КО для каналов видимого и дальнего ИК диапазонов в соответствии с указанными условиями. Временные отсчеты, на которых не выполняется хотя бы одно условие, отбрасываются.

На *третьем этапе* из оставшихся временных отсчетов формируются участки непрерывного наблюдения КО и проводится их ранжирование в соответствии с приоритетом, определяемым согласно табл. 1. Также интервалы наблюдения каждого из каналов ранжируются по их длительности.

На *четвертом этапе* путем последовательного перебора всех интервалов наблюдения с учетом приоритета в рассматриваемых спектральных каналах производится формирование «плана наблюдения». Пример формирования «плана наблюдения» представлен на рис. 3.

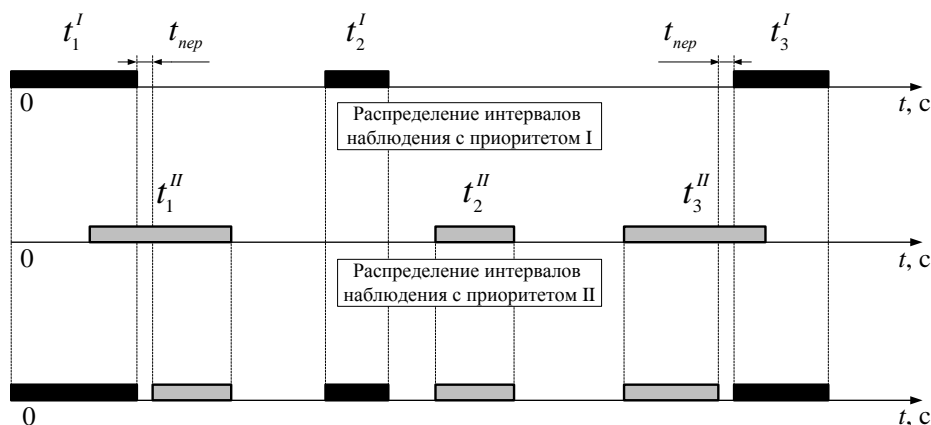


Рис. 3. Пример включения в «план наблюдения» интервалов времени наблюдения с приоритетом II

На *пятом этапе* в соответствии с выражением (1) производится расчет производительности ОЭК КА-наблюдателя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная математическая модель позволяет рассчитывать производительность контроля ближней зоны околоземного космического пространства низкоорбитальным КА,

оснащенным многоспектральным ОЭК, имея в виду при расчете приоритет вариантов наблюдения КО в зависимости от угла поля зрения его ОЭК и дальности получения информации о наблюдаемых объектах требуемого качества. При этом должны учитываться особенности условий их наблюдения в видимом и дальнем ИК диапазонах, относительные положения КА-наблюдателя и КО в ОКП, а также их относительное перемещение и условия освещенности. Расчет основан на определении таких интервалов времени наблюдения КО, которые удовлетворяют условиям наблюдения в каждом спектральном канале:

$$\forall t_{VIS} \in t_{набл} \mid \varphi^C(t_{набл}) \leq 0^\circ \wedge \varphi^\Phi(t_{набл}) \leq 90^\circ \wedge w_\Theta(t_{набл}) \leq w_{\Theta \min} \wedge w_M(t_{набл}) \leq w_{M \min} \wedge l(t_{набл}) \leq l_{VIS \text{ обн max}},$$

$$\forall t_{MWIR} \in t_{набл} \mid w_\Theta(t_{набл}) \leq w_{\Theta \min} \wedge w_M(t_{набл}) \leq w_{M \min} \wedge w_3(t_{набл}) \leq w_{3 \min} \wedge l(t_{набл}) \leq l_{MWIR \text{ обн max}},$$

$$\forall t_{LWIR} \in t_{набл} \mid w_\Theta(t_{набл}) \leq w_{\Theta \min} \wedge w_M(t_{набл}) \leq w_{M \min} \wedge w_3(t_{набл}) \leq w_{3 \min} \wedge l(t_{набл}) \leq l_{LWIR \text{ обн max}},$$

где φ^C – угол освещенности КО Солнцем;

φ^Φ – фазовый угол освещенности КО Солнцем;

w_Θ, w_M – углы между направлением на Солнце и Луну и направлением линии визирования МЦА соответственно.

Новизна разработанной математической модели заключается в следующем:

- расчете производительности ОЭК КА-наблюдателя, осуществляемом для группировки из нескольких КО;
- учете условий наблюдения КО в ИК диапазоне и вызванных ими ограничений;
- введении и учете приоритетов вариантов наблюдения КО;
- возможности формирования плана наблюдения для заданных характеристик ОЭК и параметров орбит КА-наблюдателя и КО.

Разработанная математическая модель может быть использована для осуществления:

- решения обратной задачи – определения параметров орбиты КА-наблюдателя, оснащенного многоспектральным ОЭК, которая будет обеспечивать максимум производительности контроля ближней зоны ОКП при следующих заданных значениях: угла поля зрения, дальности получения информации о наблюдаемых объектах требуемого качества, количества КО и параметров их орбит;
- оценивания вклада каждого варианта наблюдения в производительность контроля ближней зоны ОКП КА-наблюдателем, оснащенный многоспектральным ОЭК.

Список используемых источников

1. Люхин А.В., Умбиталиев А.А. Задачи космических оборонных видеоинформационных систем // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. – СПб.: НИИТ, 2013. – Вып. 2. – С. 3–14.
2. Коршунов Д.С., Григорьев А.Н. Прогнозирование качества космических снимков космических систем дистанционного зондирования: // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2010. – Вып. 629, ч. 1. – С. 143–147.
3. К вопросу учета условий освещенности при съемке космических объектов фотографическими средствами / С.Г. Емельянов, О.И. Атакищев, Д.С. Коршунов и др. // Известия Юго-Западного гос. ун-та. – Курск.: ЮЗГУ, 2012. – Вып. №3, ч. 1. – С. 14–19.
4. Коршунов Д.С., Алтухов А.И. Модель выбора оптимального ракурса съемки с учетом условий освещенности // Сборник трудов V Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий». – М.: НЦ ОМЗ ОАО «Российские космические системы», 2012. – С. 16–18.

5. *Кориунов Д.С., Алтухов А.И.* Прогнозирование качества изображений космических объектов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – СПб.: ИТМО, 2013. – Вып. №3. – С. 36–42.

6. *Иванов В.Г., Каменев А.А.* Оценивание дальности обнаружения космических объектов бортовой многоспектральной оптико-электронной аппаратурой с матричными фотоприемными устройствами смотрящего типа // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. – СПб.: НИИТ, 2016. – Вып. 3. – С. 14–22.

7. *Чеботарев Г.А.* Аналитические и численные методы небесной механики. – М.: Наука, 1965. – 368 с.

А.В. Калюжный,
В.А. Максимов,
кандидат техн. наук;
А.О. Шушаков,
кандидат техн. наук

МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГЕТЕРОГЕННОЙ БОРТОВОЙ СИСТЕМЫ ХРАНЕНИЯ ДАННЫХ С УЧЕТОМ НЕОДНОРОДНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ВАЖНОСТИ ХРАНИМЫХ ДАННЫХ

Представлена модель функционирования гетерогенной бортовой системы хранения данных космического аппарата дистанционного зондирования Земли. Модель учитывает неоднородность структуры хранимых данных по информационной важности. Она включает соотношения для определения значений показателей отказоустойчивости, оперативности и ресурсоемкости функционирования системы хранения данных. Модель может применяться для анализа различных вариантов структуры и способов хранения данных на этапе построения и применения гетерогенных систем хранения. Моделирование функционирования системы хранения данных основано на декомпозиции информационных процессов функционирования системы, выявления связей между ними, а также зависимостей значений частных показателей качества функционирования системы хранения данных от ее структуры, применяемых способов хранения и состояния.

Ключевые слова: система хранения данных, отказоустойчивость, космические аппараты дистанционного зондирования Земли.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время при проектировании вычислительных систем намечается устойчивая тенденция к консолидации различных видов их памяти. В наземных автоматизированных комплексах такая консолидация, как правило, осуществляется с целью компенсации разрыва в производительности между различными по назначению накопителями памяти. На текущий момент существует достаточно большой набор программных технологий (*Microsoft PreFetch*, *Microsoft Tiering*, *AMD FuzeDrive*) и аппаратно-программных (*Intel Optane*), позволяющих обеспечить такую консолидацию.

Однако подобные решения для космического применения недостаточно разработаны в силу объективных причин (небольшой набор аппаратных средств, низкая производительность бортовой цифровой вычислительной системы и пр.) [1]. В то же время указанные технологии являются крайне актуальными, так как применение основанных на различных физических принципах накопителей позволяет существенно повысить как надежность хранения данных, так и отказоустойчивость системы хранения данных космического аппарата (КА) в целом. Кроме того, использование разных способов хранения для различной по важности информации (командно-программная информация, телеметрия, целевая информация) позволяет гибко управлять параметрами надежности хранения и оперативности доступа к информации [2].

Качество выполнения целевой функции космических аппаратов дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ) в большой степени зависит от тактико-технических характеристик и особенностей функционирования бортовой системы хранения данных (БСХД), так как с момента получения и первичной обработки целевой информации (ЦИ) до момента ее выдачи в высокоскоростную радиолинию данные хранятся в СХД, которая подвергается влиянию различных неблагоприятных факторов космического пространства. Анализ качества целевой информации, получаемой наземными пунктами приема и обработки информации, показыва-

ет, что существенная ее часть непригодна для дальнейшей обработки в результате искажений, вносимых в процессе хранения и передачи данных.

В рамках развития систем ДЗЗ негативное влияние факторов космического пространства можно компенсировать путем либо эволюционного развития текущих вариантов систем хранения данных (с увеличением их емкости и повышением надежности компонентов), либо путем внедрения новых систем хранения данных, учитывающих особенности хранимых данных и применяющих различные способы хранения данных в системе. Разработка и применение таких систем оказываются возможными благодаря развитию технологий распределенного сетевого хранения данных, достижений теории кодирования, а также применению технологии управления жизненным циклом информации, которые предусматривают размещение и хранение различных данных в различных элементах системы с различными параметрами в зависимости от непосредственной важности этих данных для конечного потребителя (либо для выполнения целевой функции изделия) [3].

В работе предлагается подход, основанный на применении гетерогенной СХД. Гетерогенность СХД заключается, во-первых, в применении при ее построении запоминающих устройств, основанных на различных физических принципах, во-вторых, в применении для различных по важности данных различных способов хранения. Способ хранения включает в себя выбор восстанавливающего кода в зависимости от важности данных, размещение данных по элементам СХД и применение помехоустойчивого кодирования в зависимости от типа накопителя [4].

Однако на данный момент методы построения и применения гетерогенных систем хранения недостаточно разработаны в связи со сложностью формализации и представления процессов преобразования и хранения результатов ДЗЗ. В результате возникает актуальная проблема выявления взаимосвязей между показателями качества самой системы хранения данных и комплексным показателем качества ее функционирования, включающим:

- 1) показатель отказоустойчивости – вероятность отсутствия неустраняемых ошибок и вероятность доступности данных ДЗЗ;
- 2) показатель оперативности – время чтения/записи единицы информации;
- 3) показатель ресурсоемкости – информационная избыточность хранимых данных.

МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГЕТЕРОГЕННОЙ БОРТОВОЙ СИСТЕМЫ ХРАНЕНИЯ ДАННЫХ С УЧЕТОМ НЕОДНОРОДНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ВАЖНОСТИ ХРАНИМЫХ ДАННЫХ

Модель функционирования гетерогенной бортовой системы хранения данных выражает зависимость показателей качества функционирования СХД от ее структуры и применяемых способов хранения. Исходными данными для моделирования являются: структура S_0 СХД, состояние $S_s(t)$ модулей памяти (МП), структура S_d данных, множество $\{Sp_k\}$ способов хранения данных.

Рассматриваемая модель СХД КА ДЗЗ может быть применена для расчета показателей качества СХД и показателей качества ее функционирования как для существующих на текущий момент способов хранения данных (с двойной или тройной репликацией данных), так и для перспективных СХД КА ДЗЗ, использующих дифференцированный подход к хранению данных в зависимости от их важности и применяющих различные типы модулей памяти. Формализация показателей качества СХД КА ДЗЗ заключается в представлении их в форме аналитических выражений, описывающих влияние составных подсистем СХД на ее облик в целом.

В общем случае результативность функционирования БСХД характеризуется показателем отказоустойчивости функционирования БСХД – вероятностью P_{S_k} того, что данные будут доступны и не будут содержать неустраняемых ошибок [5, 6]:

$$P_{S_k} = Pa_k \cdot Pe_k, \quad (1)$$

где Pa_k – вероятность доступности данных;

Pe_k – вероятность отсутствия неустранимых (необнаруживаемых) ошибок.

Каждая из компонент этого показателя (целевой функции) представляется следующим образом [7]:

$$Pa_k(So, a_k, \Omega(B_k)) = \sum_{i=0}^{n_k - k_k} \frac{C_i^{Z(\Omega(B_k))} \cdot C_{n_k - i}^{X(So, \Omega(B_k)) - Z(\Omega(B_k))}}{C_{n_k}^{X(So, \Omega(B_k))}}, \quad (2)$$

где $\langle n_k, k_k \rangle$ – параметры конструкции восстанавливающего кодирования a_k ;

$\Omega(B_k)$ – выбранное размещение блоков данных по МП;

$X(So, B_k)$ – количество блоков данных, распределенных по СХД;

$Z(So, B_k)$ – количество блоков данных, недоступных в результате сбоев или отказов МП либо контроллеров памяти.

Число блоков, относящихся к МП, находящемуся в состоянии сбоя/отказа $Z(So, b_k)$ в момент восстановления результатов наблюдения, непосредственно зависит от распределения $\Omega(B_k)$ блоков по МП и от параметров надежности МП.

Для расчета вероятности возникновения неустранимых ошибок необходимо учитывать достаточно большое количество параметров: стойкость МП к тяжелым заряженным частицам (ТЗЧ), вероятность возникновения битовых ошибок в сочетании с контроллером памяти и МП, применяемый тип помехоустойчивого кодирования, конструкцию кода и пр.

В общем случае при кодировании с помощью блокового помехоустойчивого кода [8]

$$c_k = \langle m_k, q_k, \mu_k \rangle, \quad (3)$$

где m_k – общее количество символов в блоке данных,

q_k – количество информационных символов в блоке данных,

μ_k – корректирующая способность кода.

Вероятность отсутствия неустранимых или необнаруживаемых ошибок в блоке данных k -й важности длиной m_k бит при хранении в j -м типе МП [9, 10]

$$Pe_k = \prod_{j=0}^J \left((1 - Po_j)^{m_k} + \sum_{i=1}^{\mu_k} C_{m_k}^i \cdot Po_j^i \cdot (1 - Po_j)^{m_k - i} \right)^{Y_j(\Omega(B_k))}, \quad (4)$$

где J – число типов МП, входящих в структуру СХД;

Po_j – вероятность искажения бита в блоке данных, хранимом в j -м типе МП;

$Y_j(\Omega(B_k))$ – количество блоков данных, размещенных в j -м типе МП в соответствии с размещением $\Omega(B_k)$.

Оперативность процессов записи и чтения при хранении данных складывается из времени, которое затрачивается устройством управления СХД на выбор способа хранения данных, времени выполнения процедуры восстанавливающего кодирования, времени на передачу блоков данных по бортовой информационно-коммуникационной сети (БИТС) к соответствующим МП, времени, затрачиваемом КТНИ на выполнение процедуры помехоустойчивого кодирования, и времени на запись данных в МП. При этом целесообразно оценивать оперативность процессов чтения и записи в расчете на единицу информации [11].

Показатель оперативности записи имеет вид

$$T_w = \left(\frac{\sum_{k=0}^K (O_{ack}(V_k) + O_{bck}(V_k, n_k))}{PR_{MU} \cdot R} + \max_j \left(\frac{O_{cjk} \left(\sum_{k=0}^K N_{BLk}(\Omega(B_k)) \right)}{PR_j} \right) \right) + \max_j \left(\frac{\sum_{k=0}^K N_{BL}(\Omega(B_k)) \cdot V_{BL}}{U_{trj}} \right) + \max_j \left(\frac{\sum_{k=0}^K N_{BL}(\Omega(B_k)) \cdot V_{BL}}{U_{wj}} \right) / V_D, \quad (5)$$

- где V_D – информационная емкость результатов ДЗЗ;
 $N_{BL}(\Omega(B_k))$ – число блоков данных, назначенных на j -й МП;
 V_{BL} – информационная емкость блока данных;
 U_{trj} – пропускная способность бортовой информационной сети при передаче данных на j -й МП;
 U_{wj} – скорость записи данных в j -й МП;
 PR_{MU} – производительность устройства управления;
 PR_j – производительность КТНИ, к которому относится j -й МП;
 $O_{cjk}(N_{BL})$ – трудоемкость помехоустойчивого кода, применяемого для записи данных k -й важности в j -й МП;
 $O_{ack}(V_k)$ – трудоемкость алгоритма восстанавливающего кодирования для k -й важности данных;
 O_{bck} – трудоемкость алгоритма размещения блоков данных по элементам СХД;
 R – количество одновременно функционирующих УУ СХД.

Показатель оперативности чтения описывается следующим образом [12]:

$$T_R = \left(\frac{\sum_{k=0}^K O_{adk}(V_k)}{PR_{MU} \cdot R} + \max_j \left(\frac{O_{cdjk} \left(\sum_{k=0}^K N_{BLk}(\Omega(B_k)) \right)}{PR_j} \right) \right) + \max_j \left(\frac{\sum_{k=0}^K N_{BL}(\Omega(B_k)) \cdot V_{BL}}{U_{trj}} \right) + \max_j \left(\frac{\sum_{k=0}^K N_{BL}(\Omega(B_k)) \cdot V_{BL}}{U_{wj}} \right) / V_D, \quad (6)$$

- где O_{adk} – трудоемкость алгоритма декодирования восстанавливающего кода, примененного для данных k -й важности;
 O_{cdjk} – трудоемкость алгоритма декодирования помехоустойчивого кода, применяемого для записи данных k -й важности в j -й МП;
 U_{wj} – скорость чтения данных из j -го МП.

Показатель ресурсоемкости, выраженный информационной избыточностью, вносимой восстанавливающим и помехоустойчивым кодированием для данных k -го типа, может быть описан следующим выражением [13]:

$$Red(Sp_k) = red_a(a_k) + \frac{red_c(c_{kj}) \cdot N_{BL}(\Omega(B_k))}{\eta_k}, \quad (7)$$

- где $red_a(k)$ – информационная избыточность, вносимая восстанавливающим кодированием;
 $red_c(k, j)$ – информационная избыточность, вносимая помехоустойчивым кодированием, выбранным для данных k -го типа, j -го типа МП;
 η_k – количество блоков, на которые разбивается область данных k -го типа в соответствии с восстанавливающим кодом.

Таким образом, выражения (1)–(7) представляют собой модель распределенного хранения данных в гетерогенной СХД. При этом выражения (1), (2), (4) описывают показатель резуль-

тативности, выражения (5), (6) описывают показатель оперативности, а выражение (7) – показатель ресурсоемкости функционирования СХД.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГЕТЕРОГЕННОЙ БОРТОВОЙ СИСТЕМЫ ХРАНЕНИЯ ДАННЫХ

Для проектирования бортовой СХД КА ДЗЗ было проведено имитационное моделирование ее функционирования. Все эксперименты проводились в одинаковой вычислительной среде (среда разработки – MatLab 2017 г., ПЭВМ на базе процессора Intel Core i5).

В работе была использована процедура автоматической генерации состояний МП на основе их средних показателей надежности, а также условий функционирования (типовых параметров орбит КА, интенсивности ионизирующего излучения космического пространства и ТЗЧ) [14]. Для каждого состояния СХД генерировалось по 1000 наборов входных данных.

Моделирование хранения данных проводилось на случайном интервале времени (от минуты до 24 часов), что соответствует реальной продолжительности размещения информации в СХД КА ДЗЗ.

Исходными данными в части стойкости элементов СХД к воздействию ионизирующего излучения космического пространства (ИИ КП) являлись данные производителей электронной компонентной базы.

Моделирование хранения целевой информации в СХД КА ДЗЗ проводилось с целью анализа качества функционирования СХД КА ДЗЗ.

При моделировании хранения в качестве исходных данных задавались структура хранимых данных (табл. 1), требования к надежности хранения данных для каждого типа данных, варианты структуры СХД и характеристики МП, варианты восстанавливающих кодов, варианты помехоустойчивых кодов [15, 16].

При моделировании оценивались зависимости показателей отказоустойчивости СХД от продолжительности функционирования КА ДЗЗ. Получаемая статистика в существенной степени зависела от объема и структуры поступающих данных ДЗЗ, состояний и параметров МП, продолжительности хранения данных [17, 18].

Моделировались два варианта функционирования СХД с оцениванием показателя ее отказоустойчивости.

В первом варианте моделировалось функционирование гетерогенной СХД на протяжении срока активного существования (10 лет) для случая, когда способ хранения учитывал полную загруженность СХД при неизменном способе хранения данных с учетом информационной важности данных (табл. 1).

Во втором варианте объем хранимых данных изменялся, и при каждом поступлении данных оперативно формировался способ их хранения.

Таблица 1

Типы данных для моделирования функционирования СХД КА ДЗЗ

Степень важности данных	Удельная емкость данных	Описание хранимых данных
$k = 0$	$F_0 = 0.1$	Загрузочные данные для модуля накопителя, программы целевой обработки ЦИ, критически важные служебные данные
$k = 1$	$F_1 = 0.2$	Служебные метаданные, данные умеренной важности
$k = 2$	$F_3 = 0.7$	Области данных изображения

На рис. 1 представлена зависимость значения показателей отказоустойчивости СХД от времени функционирования КА ДЗЗ при дифференцировании типов данных по важности [19].

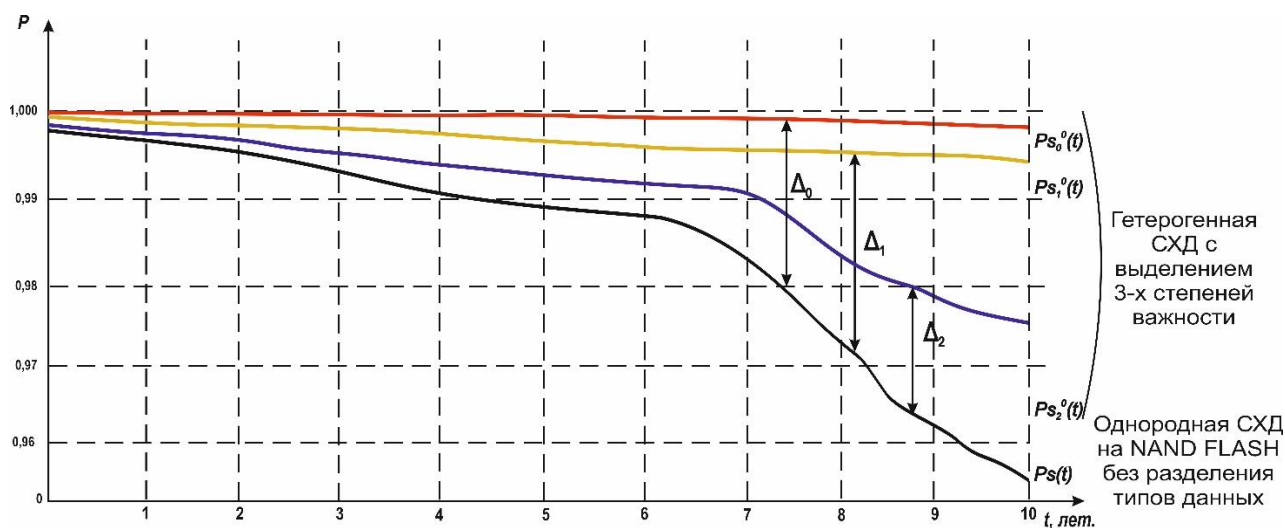


Рис. 1. Зависимость показателей отказоустойчивости СХД от времени функционирования СХД КА ДЗЗ при дифференцировании типов данных по важности

Как видно из анализа рис. 2, наибольший прирост отказоустойчивости достигается для наиболее важных данных (таблица квантования, имеющая наименьшую информационную емкость – 10% от общей информационной емкости) при сроках функционирования больше 5 лет. На втором этапе моделирования (рис. 2) оценивался прирост отказоустойчивости СХД при использовании алгоритма хранения информации на основе комбинирования способов размещения и кодирования неоднородных по важности данных (этап функционирования).

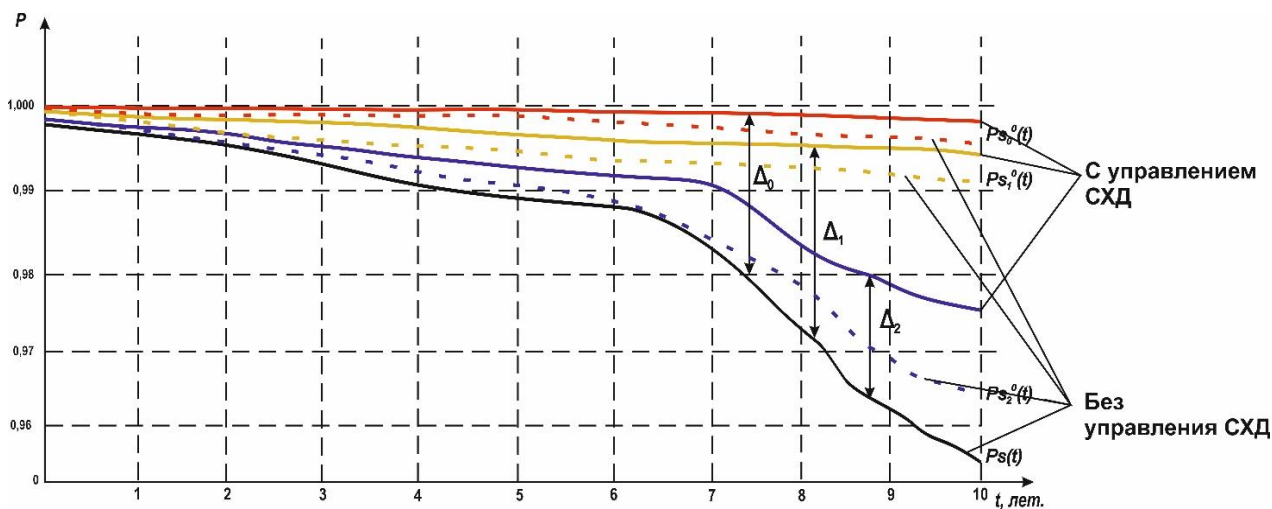


Рис. 2. Зависимость показателей отказоустойчивости СХД от времени функционирования СХД КА ДЗЗ с применением и без применения алгоритма хранения информации

Анализ результатов моделирования показал [20], что значение комплексного показателя отказоустойчивости, для срока активного существования (САС) КА 7 лет, увеличивается с 0,983 для существующего подхода до 0,993 для предлагаемого подхода. Для САС КА 10 лет значение показателя отказоустойчивости увеличивается с 0,956 до 0,987. При этом вероят-

ность отказа уменьшается в 2,35–3,52 раза. Это обусловлено меньшей подверженностью элементов гетерогенной СХД (MRAM, FRAM, PCRAM) воздействию неблагоприятных условий космического пространства.

Применение гетерогенной СХД позволяет увеличить эффективную емкость системы хранения данных до 12% за счет снижения степени информационной избыточности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемая концепция распределенного хранения данных в гетерогенной системе реализована при проектировании БСХД КА ДЗЗ.

Рассмотренная модель функционирования гетерогенной бортовой системы хранения данных с учетом неоднородной информационной важности хранимых блоков позволяет оценить взаимосвязь показателей качества функционирования гетерогенной СХД КА ДЗЗ. Модель описывает характер процессов, происходящих в системе хранения данных КА ДЗЗ, в зависимости от ее состава и применяемых способов хранения, количества выделяемых уровней важности и их соотношения в хранимой информации [21].

Новизна модели состоит в том, что при оценивании показателя безотказности БСХД КА ДЗЗ учитываются не только параметры самой СХД, но и структура хранимых данных, а также гетерогенность самой системы и способов хранения.

Практическая значимость модели заключается в возможности оценивать качество функционирования системы хранения данных для каждого из типов хранимых данных с учетом выбранного состава системы, ее состояния и применяемых управляющих воздействий.

Список используемых источников

1. *Захаров И.В., Крмез Г.В.* Построение бортовых вычислительных систем с учетом результатов испытаний элементной базы в условиях космического пространства // Научное обозрение. – Саратов: ООО «Буква», 2014. – Вып. 2. – С. 176–179.
2. Chang L. Bigtable: A distributed storage system for structured data. / L. Chang, S. Ghemawat, W.C. Hsieh and alt // OSDI'06: Seventh Symposium on Operating System Design and Implementation. – Seattle, 2006. – P. 205–218.
3. Cidon A. Copysets: Reducing the Frequency of Data Loss in Cloud Storage / A. Cidon, S. Rumble, R. Stutsman, S. and alt // USENIX Annual Technical Conference. – Stanford, 2013. – P. 121–126.
4. *Максимов В.А., Крмез Г.В., Захаров И.В.* Построение распределенных запоминающих устройств бортовых вычислительных систем космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. – Вып. 652. – С. 160–166.
5. *Дудкин А.С., Максимов В.А.* Подход к формированию модели системы хранения данных в перспективных космических аппаратах дистанционного зондирования Земли // Международный научно-исследовательский журнал. – Екатеринбург: Полиграфист, 2016. – № 10 (52), ч. 2. – С. 82–85.
6. *Максимов В.А., Молчанов О.Е.* Модель распределенного хранения данных в кластерах перспективных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Вестник Российского нового университета. Сер. Сложные системы: модели, анализ, управление. – М.: Российский новый университет, 2017. – Вып. 3. – С. 34–38.
7. Network Coding for Distributed Storage Systems. / A. Dimakis, P. Godfrey, M. Wainwright, K. Ramchandran // Proceedings of the 26th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM). – 2007. – P. 256–268.

8. A Survey on Network Codes for Distributed Storage / A. Dimakis, K. Ramchandran, Y. Wu, C. Suh // CSIT. – 2010. – P. 12–18.
9. Wu Y., Dimakis A. G., Ramchandran K. Deterministic regenerating codes for distributed storage // Allerton Conference “Control Computing and Communication”. – 2007. – P. 236–242.
10. Network Coding for Distributed Storage Systems. Information Theory / A. Dimakis, P. Godfrey, Y. Wu, M. Wainwright, K. Ramchandran // Proceedings of the 26th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM). – 2010. – P.15–23.
11. Ivanichkina L. and Neporada A. Mathematical Methods and Models of Improving Data Storage Reliability Including Those Based on Finite Field Theory // Moscow, Acronis Corp. Conference. – 2015. – P. 15–19.
12. Leong, D., Dimakis A.G., Ho T. Distributed Storage Allocation for High Reliability // Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC). – 2010. – P. 36–44
13. Weatherspoon H. and Kubiatowicz J. Erasure coding vs. replication: A quantitative comparison // Proceedings of the First International Workshop on Peer-to-Peer Systems (IPTPS 2002). – 2002. – P. 65–78.
14. Модель космоса: в 2 т. / под ред. М.И. Панасюка, Л.С. Новикова. – Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. – М.: КДУ, 2007. – Т. 2. – 1144 с.
15. MRAM Space ISS Research – URL: https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/mram/index.html (дата обращения: 30.04.2019).
16. Luo Y. Characterizing Application Memory Error Vulnerability to Optimize Datacenter Cost via Heterogeneous-Reliability Memory // Proceedings of the 2104 44th Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable systems and Networks, DSN 2014. – P. 467–478.
17. Spacewire Project. – URL: <http://spacewire.esa.int/WG/SpaceWire/SpW-WG-Mtg18-Proceedings/Documents/SpaceFibre%20ECSS%20Draft%20D%20v1.14.pdf> (дата обращения: 12.01.2019).
18. Use of FRAM Memories in Spacecrafts Claudio Sansoè and Maurizio Tranchero. – URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.474.1265&rep=rep1&type=pdf> (дата обращения: 12.01.2019).
19. Venkatesan V. Reliability Analysis of Data Storage Systems // PHD Theses, Pasadena. – 2012. – P.169–179.
20. Басыров А.Г., Максимов В.А. Алгоритм управления хранением информации в гетерогенных системах хранения данных перспективных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Научно-технические исследования в космических исследованиях Земли. – М.: Медиа паблишер, 2017. – Т. 9, № 2. – С. 6–15.
21. Alvarez G.A., Burkhard W.A., Cristian F. Tolerating Multiple Failures in RAID Architectures With Optimal Storage and Uniform Declustering // Proceedings of the 24th International Symposium on Computer Architecture. – 2002. – P. 67–72.

А.В. Малюгин,
кандидат военных наук, доцент;
Л.В. Пилипенко;
С.Г. Хлебников,
кандидат военных наук

СИНТЕЗ РАЦИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ РАСЧЕТОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ПОЛИГОНА

В статье представлена методика получения рациональной структуры испытательных расчетов измерительного комплекса полигона. Для обоснования состава групп обучения испытательных расчетов измерительного комплекса полигона используется метод целочисленного линейного программирования. В качестве коэффициентов целевой функции выступают уровни подготовленности оператора по конкретному измерительному средству полигона.

Ключевые слова: структурный синтез, линейное программирование, рациональный состав, испытательный расчет, уровень подготовленности, измерительное средство.

ВВЕДЕНИЕ

Для получения и обработки измерительной информации на испытательных полигонах формируются и подготавливаются испытательные расчеты, включающие в себя специалистов измерительного комплекса полигона (ИКП). При этом качество решения задач ИКП по предназначению в большой мере зависит от представления данными специалистами роли и места решаемых ими частных задач, осознания процессов функционирования эксплуатируемой техники [1], т. е. от уровня подготовленности операторов испытательных расчетов (ИР) на данном конкретном средстве измерительного комплекса полигона. В связи с этим задача определения рациональной структуры испытательных расчетов в зависимости от уровня подготовленности операторов ИР ИКП является актуальной. Под структурой испытательных расчетов в данной статье понимается состав и распределение операторов ИР по видам измерительных средств. Под оператором ИР понимается специалист, подготавливаемый или переподготавливаемый на данное средство измерения.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ СИНТЕЗА РАЦИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ РАСЧЕТОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ПОЛИГОНА

Система подготовки операторов ИР измерительного комплекса полигона включает три этапа, представленных на рис. 1.

Мероприятия I этапа связаны с планированием процесса комплектования операторами групп обучения. Мероприятия начинаются заблаговременно с прибытием личного состава в подразделения полигона и после их комплектования заканчиваются изданием приказа на организацию боевой подготовки, в котором определяются сроки стажировки операторов и назначаются руководители обучения (наставники).

Мероприятия II этапа включают освоение операторами программ подготовки, связанными с работой на средствах измерения, а также с мероприятиями, непосредственно связанными с подготовкой к сдаче на допуск к самостоятельной работе (СР) [2]. Мероприятия этого этапа начинаются с момента начала обучения и заканчиваются представлением операторов к сдаче зачетов на допуск к СР.

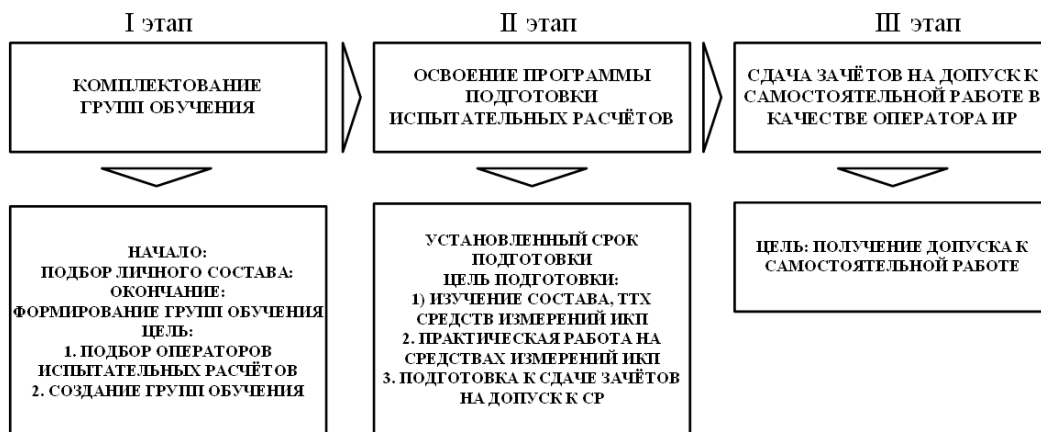


Рис. 1. Структура системы подготовки испытательных расчетов

Мероприятия III этапа включают сдачу зачетов на допуск к СР в качестве операторов ИР определенного измерительного средства или группы измерительных средств, входящих в состав ИКП. Мероприятия III этапа определены в руководящих документах по организации боевой подготовки в Вооруженных Силах Российской Федерации [2].

Первая стадия I этапа достаточно формализована и регулируется руководящими документами [3], а вот вторая стадия – формирование групп обучения – строится исходя из предложений экспертов научно-испытательных центров (НИЦ). Причем от качества выполнения этой стадии зависит эффективность функционирования всей системы на последующих этапах.

На рис. 2 представлена графическая интерпретация системы функционирования подготовки операторов ИР, в которой субъектом управления выступает заместитель начальника НИЦ по научно-испытательной работе, а объектом управления – испытательная база (группа, команда).

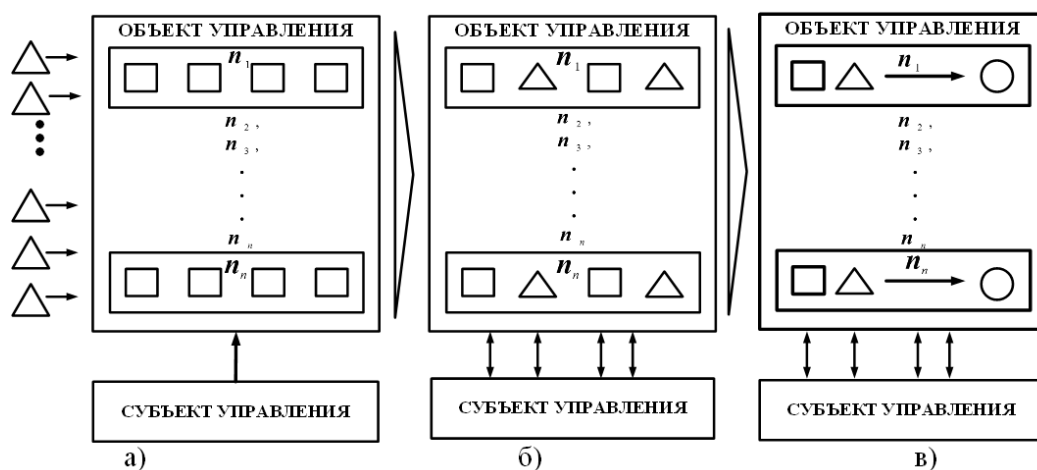


Рис. 2. Схема процесса подготовки операторов:

- \triangle – оператор расчета;
- \square – средство измерения;
- $\square\triangle$ – испытательный расчет;
- \bigcirc – цель функционирования, сдача зачетов на допуск к СР;
- n – номенклатура разнотипных средств измерений (траекторных измерений, радиотелеизмерений, сигнальных и внутрисистемных измерений) входящих в состав ИКП

На входе системы задается n число заявок операторов (рис. 2,а). Внутри этой системы субъект управления распределяет заявки по подсистемам (набор осуществляется по специальностям ИКП) и формирует группы обучения внутри подсистем (рис. 2,б). На этом этап комплектования групп обучения заканчивается, и начинается этап подготовки испытательных расчетов (рис. 2,в).

На этапе освоения программы обучения каждая сформированная группа обучения функционирует как единое целое, прекращение существования этих групп либо создание новых групп для системы нецелесообразны.

Таким образом, необходимо найти такую структуру сочетаний «оператор ИР – вид средства измерения» (рис. 2,б), при которой на каждое средство ИКП попадет оператор ИР, наиболее подготовленный по данному конкретному виду средства ИКП.

Постановка задачи синтеза рациональной структуры испытательных расчетов выглядит следующим образом.

Дано: группы обучения, представляющие собой множество обучаемых операторов ИР:

$$S = \langle O, V, P, E, \gamma \rangle,$$

где O – множество обучаемых операторов ИР;

V – множество видов средств измерения;

E – множество оценок уровня подготовленности оператора ИР;

γ – результаты оценивания операторов ИР по видам средств измерения, ставящие в соответствие каждому назначению $\langle o_i, v_j \rangle$ оценку уровня подготовленности операторов $e_{ij} \in E$, которое определяется выражением

$$\gamma: O \times V \rightarrow E.$$

Найти: оптимальное отношение, отражающее назначение обучаемого оператора ИР на вид средства измерения:

$$\rho = \langle O, V, P \rangle, P = \{ \langle o_i, v_j \rangle \mid \varphi(o_i, v_j) = 1 \}, P \subseteq O \times V,$$

где

$$\varphi(o_i, v_j) = \begin{cases} 1 & \text{если } o_i \text{ назначен на } v_j \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

такое, что

$$\sum_{i=1}^{|O|} \sum_{j=1}^{|V|} \gamma(\langle o_i, v_j \rangle) \cdot \varphi(\langle o_i, v_j \rangle) \rightarrow \max;$$

при условии

$$\sum_{j=1}^{|V|} \varphi(o_i, v_j) = 1, \forall o_i \in O.$$

Решение задачи синтеза рациональной структуры ИР ИКП включает в себя два этапа: оценивание уровня подготовленности операторов ИР ИКП и решение оптимизационной задачи по поиску рациональной структуры ИР ИКП.

ОЦЕНИВАНИЕ УРОВНЯ ПОДГОТОВЛЕННОСТИ ОПЕРАТОРОВ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ РАСЧЕТОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ПОЛИГОНА

При формировании групп обучения в обязательном порядке учитываются:

– требования к операторам согласно перечню специалистов испытательных расчетов;

- порядок подготовки специалистов испытательных расчетов;
- требования разработанных в НИЦ программ подготовки специалистов испытательных расчетов.

Порядок оценивания уровня подготовленности операторов испытательных расчетов ИКП представлен на рис. 3.

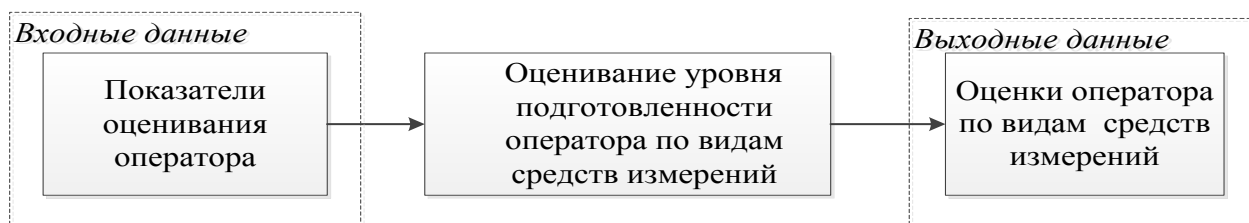


Рис. 3. Порядок оценивания уровня подготовленности операторов

На основании проведенного анализа документов, регламентирующих процесс подготовки испытательных расчетов в НИЦ [2], предлагается проводить оценивание уровня подготовленности операторов для последующего их формирования в группы обучения экспертным методом [5, 6]. Экспертов целесообразно назначать из специалистов научно-испытательных управлений НИЦ по направлениям, на которых и будет возложена задача формирования групп обучения. Возможные показатели оценивания уровня подготовленности оператора приводятся в табл. 1.

Таблица 1

Показатели оценивания уровня подготовленности оператора

№ п/п	Показатели оценивания уровня подготовленности оператора	Баллы
1	Общие обязанности военнослужащего, знание требований безопасности на рабочем месте	1–10
2	Знания законодательных и иных нормативных правовых актов	1–10
3	Специальные обязанности операторов как специалистов измерительного комплекса	1–5
4	Образование и специальные знания	1–4
5	Состояние здоровья	1–6
6	Профессионально-психологический отбор	1–4
7	Дополнительный (субъективный) показатель	1–5

Проверяются знание оператором общих обязанностей, требований безопасности на рабочем месте и знание законодательных и иных нормативных правовых актов, а также владение специальными знаниями по оцениванию, которое осуществляется путем проведения тестов по десятибалльной системе. Тестовые задания должны охватывать основные обязанности военнослужащего, указанные в Уставе Внутренней службы Вооруженных Сил Российской Федерации, основные требования безопасности и сохранения здоровья военнослужащего. При проведении тестирования определяются основные направления оценивания:

- знание общих требований безопасности при эксплуатации техники, электроприборов и т. п. в соответствии с требованиями эксплуатационных и других документов (по указанию экспертов);
- знание общих безопасных методов и приемов выполнения работ, инструктажей по требованиям безопасности; порядок стажировки на рабочем месте в соответствии с нормативными актами;

– знание общих правил правильного применения средств индивидуальной и коллективной защиты, порядок содержания их в исправности и постоянной готовности к применению по назначению;

– общие знания характера воздействия на организм человека ядовитых и вредных жидкостей (ЯТЖ), паров, газов и электрического тока; умение оказывать первую помощь пострадавшим при поражениях ЯТЖ, электрическим током и при других поражениях и травмах;

– общие знания и выполнение требований плакатов и знаков безопасности, назначение сигнальных цветов, окраски оборудования;

– общие знания по содержанию в порядке рабочего места, порядок использования инструмента и приспособлений;

– общие знания правил пользования лифтами, системами связи, вентиляции;

– общие знания обязанностей и умения действовать при возникновении аварии, пожара.

Специальные обязанности операторов как специалистов измерительного комплекса оцениваются только у тех операторов, кто обучается на смежную должность, проходит переаттестацию или назначается на другие должности в НИЦ. Оценивание таких операторов проводится по программам обучения испытательных расчетов, по пятибалльной системе.

Имеющееся образование предлагается оценивать: как среднее – 1 балл, среднетехническое – 2 балла, средне-специальное – 3 балла и высшее образование – 4 балла. Кроме того, при проведении оценивания качества образования личного состава проводится определение специфики направления обучения в средних и высших учебных заведениях, определяются специальные знания операторов. Если в ходе оценивания полученных ранее знаний эксперт определяет специфику инженерно-технического направления и способности военнослужащего к инженерно-техническому образованию, то ему ставится высшая оценка – 4 балла.

Состояние здоровья оценивает медицинская комиссия НИЦ по группам здоровья, определенным в военкоматах. Кроме того, выявляются индивидуальные способности к работе на высоте, в колодцах, в специальных сооружениях, объектах повышенной опасности и переносимость ЯТЖ.

Профессиональный психологический отбор проводится в соответствии с [5].

Дополнительный (субъективный) показатель выставляется экспертом на основании изучения операторов в процессе общения с испытуемыми в ходе выполнения ими тестовых заданий по п. 1–3.

Уровень подготовленности оператора определяется по каждому виду средств измерительного комплекса полигона, полученные оценки оператора суммируются, а в случае расхождения среди экспертов в оценках оператора берется среднее значение оценок экспертов.

РЕШЕНИЕ ОПТИМИЗАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ ПО ПОИСКУ РАЦИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ РАСЧЕТОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ПОЛИГОНА

Последовательность поиска рациональной структуры ИР ИКП представлена на рис. 4.

Нахождение значений параметров, обеспечивающих экстремум функции при наличии ограничений, наложенных на аргументы (независимые переменные), носит общее название задач математического программирования [7]. Исходные данные для задачи о нахождении рационального состава ИР представлены в виде матрицы, элементами которой являются попарные произведения $\varphi_{ij}\gamma_{ij}$:

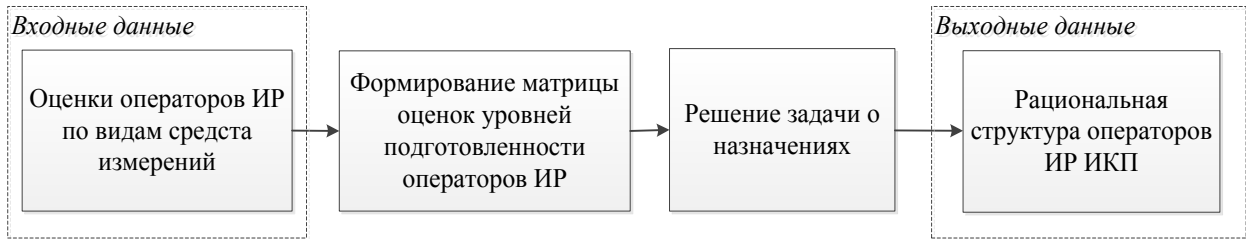


Рис.4. Последовательность поиска рациональной структуры ИР ИКП

$$\begin{bmatrix} \varphi_{11}\gamma_{11} & \varphi_{12}\gamma_{12} & \varphi_{1n}\gamma_{1n} \\ \varphi_{21}\gamma_{21} & \varphi_{22}\gamma_{22} & \varphi_{2n}\gamma_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \varphi_{m1}\gamma_{m1} & \varphi_{m2}\gamma_{m2} & \varphi_{mn}\gamma_{mn} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где

$$\varphi_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{при условии наличия ИР;} \\ 0, & \text{при условии отсутствия ИР.} \end{cases}$$

Для корректного формирования матрицы необходимо ввести ограничения:

- на количество средств ИКП (каждый оператор в матрице должен получить одно средство);
- на количество операторов на одно средство ИКП.

Ограничения на количество измерительных средств с распределенными на них операторами можно представить в виде вектора-строки B :

$$B_{[n]} = [b_1, b_2, \dots, b_n].$$

Нетрудно заметить, что при условии обязательного распределения оператора на измерительное средство матрица-строка B будет единичной.

В свою очередь, ограничения на количество операторов, на одно измерительное средство, можно представить в виде вектора-столбца D :

$$D_m = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_m \end{bmatrix},$$

где элемент d принимает целочисленные значения, равные требуемому количеству операторов на конкретное измерительное средство. Тогда общий вид задачи формирования ИР можно представить в виде

$$F(\bar{\gamma}) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \varphi_{ij}\gamma_{ij} \rightarrow \max \quad (2)$$

при

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n \varphi &\leq d_i, & i = 1(1)m, \\ \sum_{i=1}^m \varphi &= 1, & j = 1(1)n, \\ \varphi_{ij} &\geq 0; & i = 1(1)m, \quad j = 1(1)n, \\ 0 &\leq \gamma_{ij} \leq 1; & i = 1(1)m, \quad j = 1(1)n. \end{aligned}$$

Данную задачу можно решить методом целочисленного линейного программирования в редакторе электронных таблиц *Microsoft Excel*. В результате решения (2) получается матрица назначений (рис. 5), единица на пересечении номера оператора и средства измерения является маркером его назначения на данное измерительное средство.

		Виды средств измерений						
		ОС	РЛС	ТМИ	АФУ	СЕВ	СК	
Маркер назначения оператора на измерительное средство	1	0	1	0	0	0	0	1
	2	0	0	0	0	0	1	1
	3	0	1	0	0	0	0	1
	4	0	1	0	0	0	0	1
	5	0	0	0	0	0	1	1
	6	1	0	0	0	0	0	1
	7	0	0	0	0	1	0	1
	8	0	0	0	0	1	0	1
	9	1	0	0	0	0	0	1
	10	0	0	1	0	0	0	1
	11	1	0	0	0	0	0	1
	12	0	1	0	0	0	0	1
	13	1	0	0	0	0	0	1
	14	0	0	0	1	0	0	1
	15	0	0	0	0	1	0	1
	16	0	0	0	0	1	0	1
	17	0	0	0	1	0	0	1
	18	0	1	0	0	0	0	1
	19	1	0	0	0	0	0	1
	20	0	0	1	0	0	0	1
	21	1	0	0	0	0	0	1
	22	0	0	1	0	0	0	1
Количество операторов на одно средство		6	5	3	2	4	2	22

Рис.5. Пример решения задачи формирования ИР в *Microsoft Excel*

Результатом решения задачи синтеза рациональной структуры групп обучения операторов являются сформированные ИР с максимально возможным значением уровня подготовленности операторов испытательных расчетов измерительного комплекса полигона.

ПРИМЕР РАСЧЕТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРЕДЛОЖЕННОЙ МЕТОДИКИ

Пусть имеются шесть видов средств ИКП: оптические средства (ОС), радиолокационные средства (РЛС), комплексы телеметрических измерений (ТМИ), командно-измерительные системы (КИС), средства системы единого времени (СЕВ), средства измерений самолетного комплекса (СК).

Требуется сформировать группы обучения: на средства ОС – 6 человек, РЛС– 5 человек, ТМИ– 3 человека, КИС – 2 человека, СЕВ – 4 человека, СК – 2 человека.

Всего 22 человека. Проведение оценивания уровня подготовленности операторов ИР показало значения оценок, которые приведены в табл. 2.

Необходимо найти такое формирование групп обучения по видам средств ИКП, при котором их общий уровень подготовленности был бы максимальным.

Используя выражение (2), получим решение, представленное в табл. 3.

Таблица 2

Оценка уровня подготовленности операторов γ_{ij} по видам средств ИКП

№ оператора	ОС	РЛС	ТМИ	КИС	СЕВ	СК
1	26	37	36	28	28	27
2	29	26	33	28	34	38
3	30	31	26	28	31	32
4	26	34	33	28	29	32
5	33	32	35	33	32	36
6	35	33	31	32	31	25
7	32	31	33	35	35	30
8	35	34	30	29	37	25
9	38	30	31	28	27	29
10	28	28	30	27	29	30
11	35	28	28	30	35	33
12	36	38	31	38	37	32
13	34	30	25	33	26	35
14	29	36	34	38	37	28
15	30	33	34	31	36	28
16	38	35	25	28	38	34
17	37	31	31	37	34	27
18	25	38	38	30	31	26
19	37	31	28	32	28	29
20	32	26	37	36	28	38
21	35	27	29	30	25	29
22	25	33	35	26	31	34

Таблица 3

Рациональная структура испытательных расчетов измерительного комплекса

Вид средства	№ оператора	Всего в расчете, чел.
ОС	6, 9, 11, 13, 19, 21	6
РЛС	1, 3, 4, 12, 18	5
ТМИ	10, 20, 22	3
АФУ	14, 17	2
СЕВ	7, 8, 15, 16	4
СК	2, 5	2

Таким образом, в результате решения оптимизационной задачи определена рациональная структура скомплектованных групп обучения с максимально возможным значением уровня подготовленности операторов испытательных расчетов измерительного комплекса полигона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Научная новизна результатов работы заключается в системно-кибернетическом подходе к представлению и анализу функционирования системы подготовки испытательных расчетов. Обоснована необходимость предварительного определения уровня подготовленности операторов испытательных расчетов, базирующегося на методе экспертных оценок. Рациональное распределение операторов испытательных расчетов в соответствующие группы по средствам измерительного комплекса полигона проводится по результатам решения задачи целочисленного линейного программирования.

Список используемых источников

1. *Буренок В.М., Найденов В.Г.* Методы повышения эффективности применения средств и систем обеспечения испытаний, вооружения, военной и специальной техники. – М.: Издательский дом «Граница», 2006. – 274 с.
2. . Об утверждении инструкции по подготовке военнослужащих к выполнению требований безопасности в повседневной деятельности войск (сил): Приказ Министра обороны Российской Федерации 2000 года № 285. – URL: <https://base.garant.ru/6745164> (дата обращения: 08.12.2019).
3. Перечень военно-учетных специальностей: Постановление Правительства Российской Федерации от 26 июня 1993 года № 600-33. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_64215 (дата обращения: 09.12.2019).
4. Руководство про профессиональному психологическому отбору в Вооруженных Силах Российской Федерации: Приказ Министра обороны Российской Федерации 2000 [ред. от 12 мая 2005 года № 50]. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_29166 (дата обращения: 09.12.2019).
5. *Евланов Л.Г., Кутузов В.А.* Экспертные оценки в управлении. – М.: Экономика, 1978. – 133 с.
6. *Гуцикова С.В.* Метод экспертных оценок. Теория и практика. – М.: Когито-Центр, 2015. – 132 с.
7. *Гольштейн Е.Г., Юдин Д.Б.* Специальные направления в линейном программировании. – М.: URSS, 2018. – 526 с.

А.А. Масалкин,
кандидат техн. наук;
А.Н. Павлов,
доктор техн. наук, профессор;
Э.М. Халиков,
кандидат техн. наук;
И.В. Чащин,
кандидат техн. наук

МЕТОДИКА ПЛАНИРОВАНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ СПУТНИКОВОГО РАДИОКОНТРОЛЯ НА ОСНОВЕ РАЦИОНАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЕЕ ТЕХНИЧЕСКОГО РЕСУРСА

В статье предлагается методический подход к повышению эффективности контроля космической электромагнитной обстановки, основанный на рациональном распределении технического ресурса средств с использованием методов математического программирования, которые хорошо зарекомендовали себя в решении прикладных задач.

Ключевые слова: спутниковый радиоконтроль, радиоэлектронная обстановка, методы планирования.

ВВЕДЕНИЕ

Широкое применение космических систем различного назначения привело к необходимости обеспечения электромагнитной совместимости при работе радиоэлектронных средств различного целевого назначения. В результате возникла потребность в контроле добросовестного использования выделенных радиочастот с целью бесконфликтного функционирования систем связи и передачи данных. Для этого, в соответствии с решением Государственной комиссии по радиочастотам от 24 января 2001 года № 15/2 [1], в Российской Федерации была создана система спутникового радиоконтроля (ССРК). На ССРК были возложены следующие задачи:

- проведение измерений параметров излучений радиоэлектронных средств (РЭС) спутниковых служб радиосвязи гражданского назначения и оценка их соответствия нормам, установленным решениями о выделении спектра радиочастот либо разрешениями на использование радиочастот или радиочастотных каналов;
- осуществление спутникового радиоконтроля в целях обеспечения международно-правовой защиты скоординированного частотного ресурса (частотно-поляризационных планов) и выполнения международных соглашений;
- поиск и определение местоположения источников радиопомех по заявкам администраций связи, в том числе иностранных государств, российских операторов спутниковой связи и вещания и пользователей частотного ресурса;
- выявление российских космических аппаратов связи и вещания, несанкционированно использующих частотный ресурс;
- осуществление спутникового радиоконтроля за качеством распространения станциями спутниковой связи и вещания российских аналоговых и цифровых телерадиовещательных программ;
- осуществление спутникового радиоконтроля РЭС иностранных КА связи и вещания, транслирующих русскоязычные телевизионные и радиовещательные программы;

– обеспечение спутникового радиоконтроля вновь вводимых в эксплуатацию РЭС спутниковых служб радиосвязи в зоне ответственности ССРК.

ССРК решает возложенные на нее задачи в соответствии с требованиями инструкции «О порядке проведения мероприятий по радиоконтролю излучений радиоэлектронных средств спутниковых служб радиосвязи гражданского назначения».

В настоящий момент в ее состав входят пять станций спутникового радиоконтроля (СтСРК) (рис. 1), расположенных в Смоленске, Воронеже, Белгороде, Акколе и Хабаровске [2]. В соответствии с техническими характеристиками каждой из СтСРК определены зоны ее ответственности, представленные в табл. 1. В перспективе ожидается расширение ССРК за счет создания новых и использования имеющихся радиотехнических средств в интересах решения задач космического радиоконтроля [3].

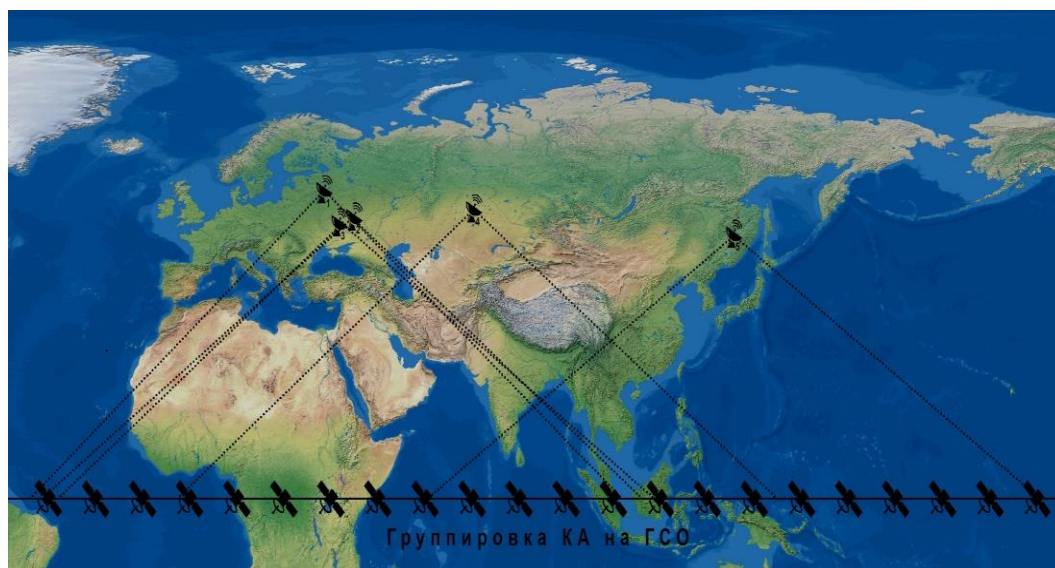


Рис. 1. Схема размещения СтСРК и их зоны ответственности

Таблица 1

Состав ССРК и зоны ответственности станций

№ п/п	Название пункта дислокации	Координаты		Зона ответственности	
		Широта	Долгота	Запад. граница	Восточ. граница
1	Смоленск	56°46' с. ш.	32°02' в. д.	42° з. д.	107° в. д.
2	Воронеж	51°40' с. ш.	39°12' в. д.	39° з. д.	112° в. д.
3	Белгород	50°36' с. ш.	36°35' в. д.	35° з. д.	115° в. д.
4	Акколь	53°17' с. ш.	69°36' в. д.	5° з. д.	146° в. д.
5	Хабаровск	48°28' с. ш.	135°03' в. д.	58° в. д.	148° з. д.

Следует отметить, что нахождение КА связи в зоне радиоконтроля не гарантирует получение информации обо всех каналах спутниковой связи данного спутника. Например, при взаимном расположении абонентов спутниковой связи и СтСРК, представленном на рис. 2, контроль канала передачи информации от КА к абоненту № 1 возможен по боковому лепестку диаграммы направленности КА связи, а контроль канала абонента № 2 невозможен. Это объясняется тем, что ширина главного лепестка диаграммы направленности при передаче информации по каналу «космос – Земля» составляет десятые доли градуса, что не позволяет

контролировать радиоканалы абонентов, находящихся на достаточном удалении от станций радиоконтроля (порядка 1000–1500 км) [4, 5].

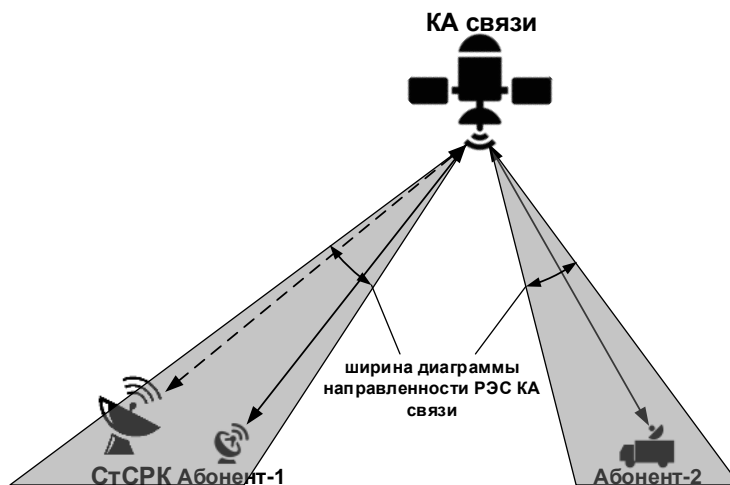


Рис. 2. Радиоконтроль абонентов спутниковой системы связи

В связи с вышеизложенным представляется целесообразным использование двух и более территориально разнесенных станций на один КА связи для увеличения количества контролируемых каналов [6]. Однако существующие подходы к планированию задействования СтСРК [6] предполагают использование комбинаторно-эвристических методов, гарантирующих получение локально оптимальных решений, а также не учитывают возможность дублирования контролируемых каналов при различных назначениях. В результате возникает необходимость поиска альтернативных методов планирования применения СтСРК, обеспечивающих максимально полное использование имеющегося технического ресурса средств контроля радиочастотной обстановки в интересах повышения результативности всей ССРК.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ НА ПЛАНИРОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ СПУТНИКОВОГО РАДИОКОНТРОЛЯ

Опишем исходные множества:

– множество СтСРК $A = \{a_i\}, i = \overline{1, I}, I$ – количество СтСРК. Каждая СтСРК характеризуется набором параметров $a_i = \langle \psi_i, \lambda_i, e_i \rangle, e_i = (G_i, P_i), i = \overline{1, I}$. Здесь введены следующие обозначения:

- ψ_i – географическая широта расположения i -й СтСРК;
- λ_i – географическая долгота расположения i -й СтСРК;
- e_i – набор параметров аппаратуры i -й СтСРК;
- G_i – коэффициент усиления приемной антенны i -й СтСРК;
- P_i – чувствительность приемной антенны i -й СтСРК;

– множество КА связи $B = \{b_j\}$, $j = \overline{1, J}$, J – количество КА, каналы связи которых подлежат радиоконтролю (поскольку данные КА находятся на геостационарной орбите, их расположение задается долготами точек стояния),

$$b_j = \langle L_j^{\text{КА}}, e_j^{\text{КА}} \rangle, e_j^{\text{КА}} = (\lambda_j^{\text{КА}}, G_j^{\text{КА}}, P_j^{\text{КА}}), j = \overline{1, J}.$$

Здесь введены следующие обозначения :

$L_j^{\text{КА}}$ – долгота точки стояния j -го КА связи;

$e_j^{\text{КА}}$ – набор параметров бортовой аппаратуры j -го КА связи;

$\lambda_j^{\text{КА}}$ – длина несущей радиоволны, используемой для передачи сообщения с борта j -го КА связи;

$G_j^{\text{КА}}$ – коэффициент усиления передающей антенны j -го КА связи;

$P_j^{\text{КА}}$ – мощность, излучаемая передающей антенной j -го КА связи;

– множество каналов «космос – Земля» $C = \{c_k, k = \overline{1, K}\}$. Множество каналов спутниковой связи j -го спутника обозначим как $C_j = \{c_\chi, \chi \in K_j\}$. Тогда

$$C = \bigcup_{j=1}^J C_j, \forall j_1, j_2 \in M : C_{j_1} \cap C_{j_2} \neq \emptyset.$$

Путем решения вспомогательной задачи представляется возможным построение потенциала доступности каналов связи:

$$\Phi(a_i, b_j, c_k) : A \times B \times C \rightarrow \{0, 1\}, \quad (1)$$

причем $\Phi(a_i, b_j, c_k) = 1$, если при назначении станции a_i на аппарат b_j канал c_k считается контролируемым, и $\Phi(a_i, b_j, c_k) = 0$ – в противном случае. Контролируемость каждого канала определяется пространственной доступностью КА связи b_j для СтСРК a_i и энергетической доступностью канала связи c_k . Пространственная доступность проверяется путем расчета угла места КА b_j для станции a_i , который должен быть более 7° . Энергетическая доступность канала c_k определяется мощностью энергии, приходящей на приемную антенну станции [5]:

$$P_{\text{вх}}(a_i, b_j, c_k) = \frac{P_j^{\text{КА}} G_{ji}^{\text{КА-Ст}} G_i(\lambda_j^{\text{КА}})^2}{(4\pi D_{ij})^2} \geq P_{\text{ТРЕБ}}, \quad (2)$$

где $P_j^{\text{КА}}$ – мощность передатчика КА b_j ;

$G_{ji}^{\text{КА-Ст}}$ – коэффициент усиления передающей антенны КА b_j в направлении антенны станции a_i ;

D_{ij} – расстояние между КА связи b_j и СтСРК a_i .

При этом, если $P_{\text{вх}}(a_i, b_j, c_k) \geq P_{\text{ТРЕБ}}$, то канал считается энергетически доступным.

Требуется построить план применения ССРК, который в общем случае можно представить как совокупность пар $\langle a_i, b_j \rangle$, соответствующих назначению СтСРК a_i на КА связи b_j :

$$\Pi \subseteq A \times B = \left\{ \langle a_i, b_j \rangle \mid i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J} \right\}. \quad (3)$$

Для удобства дальнейшей формализации каждой паре $\langle a_i, b_j \rangle \in \Pi$ сопоставим некоторую булеву переменную $x_{ij} \in \{0, 1\}$. Тогда план применения СтСРК будем описывать множеством булевых переменных $\mathbf{X} = \{x_{ij}, i = \overline{1, N}, j = \overline{1, M}\}$, $x_{ij} \in \{0, 1\}$, при этом $x_{ij} = 1$, если станция a_i назначена на аппарат b_j , и $x_{ij} = 0$ – в противном случае.

При назначении СтСРК a_i на КА b_j ($x_{ij} = 1$) контролируется некоторая совокупность (множество) каналов. Обозначим данное множество: $C_{ij} = \{c_k, k \in K_{ij}\}$, $C_{ij} \subseteq C$. Результативность каждого можно оценить количеством контролируемых каналов: $\lambda_{ij} = \text{card}(C_{ij}) = \sum_{k=1}^K \Phi(a_i, b_j, c_k)$, $i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}$. Тогда результативность всей ССРК определяется как количество контролируемых каналов в результате реализации плана применения СтСРК \mathbf{X} :

$$F(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \lambda_{ij} \cdot x_{ij}, \quad (4)$$

а задачу планирования применения СтСРК можно представить как задачу выбора

$$\mathbf{X}^* = \arg \max_{\mathbf{X} \in \Delta_\beta} F(\mathbf{X}), \quad (5)$$

где \mathbf{X}^* – оптимальный план задействования СтСРК с точки зрения результативности всей ССРК;

Δ_β – множество допустимых планов с учетом ограничений, накладываемых на процесс целевого функционирования СтСРК, $\Delta_\beta = \{ \mathbf{X} \mid r_\beta, \beta \in \mathbf{B} \}$;

$\{r_\beta\}, \beta \in \mathbf{B}$ – множество ограничений, накладываемых на процесс целевого функционирования станций.

При решении задачи планирования задействования СтСРК были учтены следующие ограничения, накладываемые на процесс целевого функционирования станций:

- каждая СтСРК может быть назначена не более чем на один КА:

$$r_1 : \sum_{j=1}^J x_{ij} \leq 1, i = \overline{1, I}; \quad (6)$$

– СтСРК назначаются только на те КА, которые находятся в их зоне ответственности:

$$r_2 : (1 - \Gamma(a_i, b_j)) \cdot x_{ij} = 0, i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}. \quad (7)$$

Здесь $\Gamma(a_i, b_j)$ – потенциал доступности КА связи, который определяется выражением

$$\Gamma(a_i, b_j) = \begin{cases} 1, & \text{если КА } b_j \text{ находится в зоне ответственности станции } a_i, \\ 0 & \text{– в противном случае.} \end{cases} \quad (8)$$

С учетом проведенных построений задача (5) относится к классу задач дискретного (булева) программирования и может быть решена либо методами дискретной оптимизации (методы переборных, направленного поиска и др.) [7], либо с помощью B -алгоритма (алгоритма Финкельштейна).

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Задача усложняется тем, что в плане задействования X существуют такие назначения $x_{i_1 j_1}, x_{i_2 j_2}$, для которых множества контролируемых каналов могут пересекаться (иметь общие элементы): $\exists i_1, i_2 = \overline{1, I}, \exists j_1, j_2 = \overline{1, J} : C_{i_1 j_1} \cap C_{i_2 j_2} = C_{i_2 j_2}^{i_1 j_1} = \{c_\chi, \chi \in K_{i_2 j_2}^{i_1 j_1}\} \neq \emptyset$. Тогда «эффект» от применения ССРК не равен сумме «эффектов» от применения каждой СтСРК, а выражение (4) не дает точной оценки результативности плана задействования X . В данном случае дальнейшее решение задачи должно основываться на проведении дополнительного анализа, выявления множества пар пересекающихся множеств

$$\{(C_{i_1 j_1}, C_{i_2 j_2}) \mid C_{i_1 j_1} \cap C_{i_2 j_2} \neq \emptyset, i_1, i_2 = \overline{1, I}, j_1, j_2 = \overline{1, J}\}$$

и модернизации функции результативности (4) с использованием принципа включения и исключения [9], позволяющего оценить мощность объединения пересекающихся множеств. Для удобства дальнейшей формализации переобозначим индексы следующим образом:

$$\langle i, j \rangle \rightarrow l : l = (i - 1) \cdot J + j, l = \overline{1, L}, L = I \cdot J. \quad (9)$$

Тогда модернизированную целевую функцию перепишем как [10]

$$F(X) = \sum_{l=1}^L |C_l| \cdot x_l - \sum_{l_1=1}^L \sum_{l_2=l_1+1}^L |C_{l_1} \cap C_{l_2}| \cdot x_{l_1} \cdot x_{l_2} + \sum_{l_1=1}^L \sum_{l_2=l_1+1}^L \sum_{l_3=l_2+1}^L |C_{l_1} \cap C_{l_2} \cap C_{l_3}| \cdot x_{l_1} \cdot x_{l_2} \cdot x_{l_3} + \dots + (-1)^L |C_1 \cap C_2 \cap C_3 \cap \dots \cap C_L| \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot \dots \cdot x_L. \quad (10)$$

Во-первых, следует отметить, что функция (10) является нелинейной, что делает невозможным применение ранее предложенных подходов и методов решения задач математического программирования для решения задачи планирования задействования СтСРК. Для разрешения данной сложности [11] предлагается способ линеаризации функции (10) с булевыми параметрами, основанный на введении дополнительных переменных

$$y_{l_1 l_2} = x_{l_1} \cdot x_{l_2} \quad (11)$$

и подстановке их в целевую функцию. При этом взаимосвязь между новой и старыми переменными описывается линейными соотношениями:

$$r_3 : y_{l_1 l_2} \leq \frac{1}{2}(x_{l_1} + x_{l_2}); \quad (12)$$

$$r_4 : y_{l_1 l_2} \geq x_{l_1} + x_{l_2} - 1. \quad (13)$$

Переменные $y_{l_1 l_2}$ можно интерпретировать как групповое применение СтСРК, а соотношения (12), (13), отражающие взаимосвязь между новыми и старыми переменными, включаются в систему ограничений (6) и (7), накладываемых на функционирование средств.

Во-вторых, построение функции (10) является отдельной трудоемкой комбинаторной задачей. В связи с этим предлагается подход к решению задачи планирования задействования ССРК, основанный на проведении итерационной процедуры формирования слагаемых целевой функции и уточнения ее значения. Предлагаемый подход можно представить в виде следующего алгоритма (рис. 3).

Шаг 1. На первой итерации $q=0$ формируются:

- целевая функция в виде $F_q(\mathbf{X}) = \sum_{l=1}^L |C_l| \cdot x_l$;
- множество допустимых планов $\Delta_\beta^q = \{ \mathbf{X} \mid r_\beta, \beta \in B \}$;
- множество учтенных дублируемых каналов Z (на первой итерации $Z=\emptyset$).

Шаг 2. Решается задача $\mathbf{X}_q^* = \arg \max_{\mathbf{X} \in \Delta_\beta^q} F_q(\mathbf{X})$.

Шаг 3. Полученное решение \mathbf{X}_q^* проверяется на наличие неучтенных дублируемых каналов.

Если $\exists l_1, l_2 = \overline{1, L}, l_1 \neq l_2 : ((x_{l_1} \cdot x_{l_2}) = 1) \wedge (|C_{l_1} \cap C_{l_2}| > 0) \wedge (\langle l_1, l_2 \rangle \notin Z)$, то выявлены неучтенные дублируемые каналы при назначении x_{l_1} , x_{l_2} и осуществляется переход на шаг 4. В противном случае полученное решение \mathbf{X}_q^* есть оптимальное, счет окончен.

Шаг 4. Модернизируются:

- целевая функция $F_{q+1}(\mathbf{X}) = F_q(\mathbf{X}) - |C_{l_1} \cap C_{l_2}| \cdot x_{l_1} \cdot x_{l_2}$;
- множество допустимых планов $\Delta_\beta^{q+1} = (\Delta_\beta^q \cap r_3^q) \cap r_4^q$;
- $Z = Z \cup \langle l_1, l_2 \rangle$.

Переход на шаг 2.

Таким образом, слагаемые функции (8) формируются по мере необходимости учета дублирования контролируемых каналов при различных назначениях, что позволяет значительно сократить размерность решаемой задачи.

Структурная схема методики решения задачи планирования применения СтСРК с использованием предложенного подхода представлена на рис. 3.

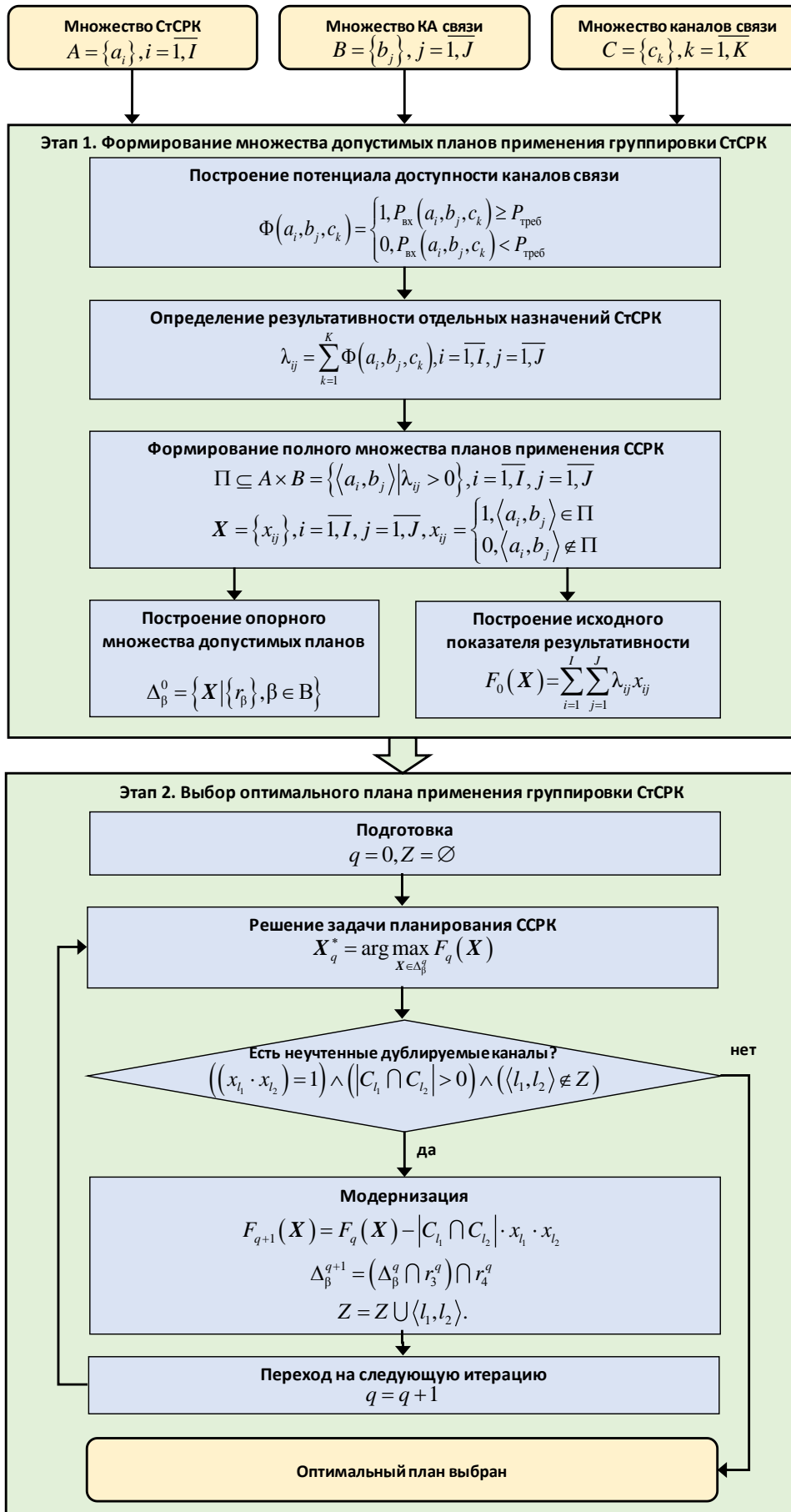


Рис. 3. Структурная схема методики планирования ССРК

Методика включает в себя два основных блока.

В первом блоке задаются исходные данные о составе, структуре и параметрах управляемой ССРК, группировке КА связи, а также каналах связи, подлежащих контролю. На основе исходных данных формируются множество допустимых планов применения и исходный показатель результативности, необходимой для постановки и решения задачи планирования ССРК.

Именно множество возможных вариантов задействования СтСРК обуславливает сложность решаемой задачи и необходимость разработки специальных методов планирования, так как выбор (поиск) рационального плана применения ССРК с использованием методов перебора представляется нецелесообразным.

Проведенные построения позволяют во втором блоке формализовать целевую функцию и ограничения и представить решаемую задачу в виде задачи булевого программирования. Происходит непосредственное решение задачи планирования применения СтСРК с использованием предлагаемого алгоритма (итерационной процедуры выбора с уточнением целевой функции).

Результаты вычислительных экспериментов с использованием предлагаемой методики планирования ССРК (рис. 4) и программно-алгоритмической модели [12] доказывают принципиальную возможность повышения результативности применения СтСРК примерно на 15–30% за счет исключения дублирования контролируемых каналов.

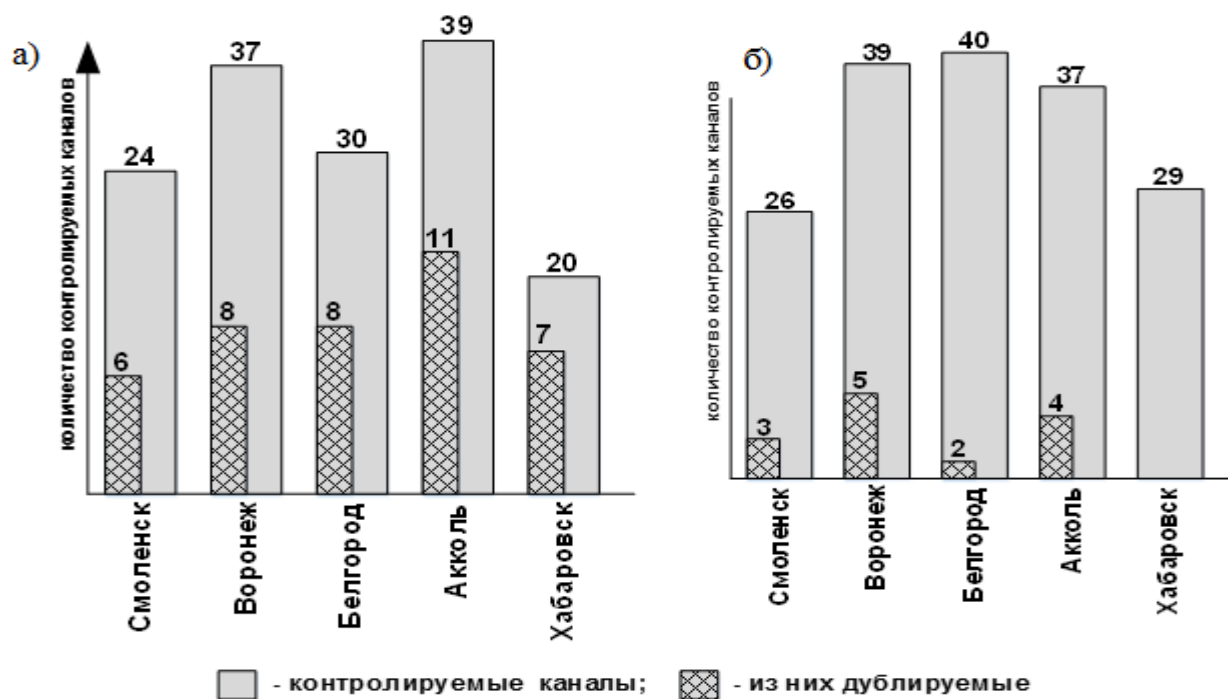


Рис. 4. Результаты планирования применения СтСРК:
 а – без исключения дублирования контролируемых каналов;
 б – с исключением дублирования контролируемых каналов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существенным отличием данной методики от остальных являются возможность учета одновременного назначения двух и более пространственно разнесенных СРК на один КА связи и оценивание их результативности. Такой подход позволяет обеспечить более рациональное использование технического ресурса средств, что приводит, в свою очередь, к росту результативности всей системы.

Методика направлена на повышение эффективности спутникового радиоконтроля за счет рационального использования технического ресурса средств, позволяет учитывать дублирование контролируемых каналов, которое неизбежно при назначении двух и более СрРК на один и тот же КА связи, обеспечивает рациональное использование технического ресурса СрРК, что делает возможным повышение результативности целевого применения системы спутникового радиоконтроля.

Предлагаемая методика направлена на поиск оптимального плана применения ССРК на основе рационального использования технического ресурса СтСРК, позволяет разрешать трудности планирования задействования СтСРК и основана на достаточно апробированном и хорошо зарекомендовавшем себя научно-методическом аппарате математического программирования.

Список используемых источников

1. О создании системы спутникового радиоконтроля: утв. решением Государственной комиссии по радиочастотам при Минкомсвязи Российской Федерации от 24 января 2001 года № 15/2. – URL: www.grfc.ru/grfc/norm_doc/resheniya-gkrch/ (дата обращения: 20.10.2019).

2. Отчет по использованию в странах участниках РСС станций спутникового радиоконтроля и систем геолокации земных станций / Региональное содружество в области связи. – 2016. – С.69. – URL: <https://docplayer.ru/44165776-Otchet-po-ispolzovaniyu-v-stranah-uchastnikov-rss-stanciy-sputnikovogo-radiokontrolya-i-sistem-geolokacii-zemnyh-stanciy.html> (дата обращения: 20.10.2019).

3. О концепции развития системы контроля за излучением радиоэлектронных средств и (или) высокочастотных устройств гражданского назначения в Российской Федерации на период до 2025 года: утв. решением Государственной комиссии по радиочастотам при Минкомсвязи Российской Федерации от 04 июля 2017 года № 17-42-06. – URL: www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71629318/ (дата обращения: 20.10.2019).

4. Рембовский А.М., Ашихмин А.В., Козьмин А.В. Радиомониторинг: задачи, методы, средства. – 4-е изд., испр. – М.: Горячая линия – Телеком, 2015. – 640 с.

5. Петрович Н.Т., Камнев Е.Ф., Каблукова М.В. Космическая радиосвязь / под. ред. Н.Т. Петровича. – 2 изд., перераб. и доп. – М.: Сов. радио, 1979. – 280 с.

6. Процедуры планирования и оптимизации сетей контроля за использованием спектра в диапазоне частот ОВЧ/УВЧ: отчет МСЭ-R SM.2356-0 (06/2015), сер. SM (управление использованием спектра). – URL: www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-SM.2356-2015-PDF-R.pdf (дата обращения: 20.10.2019).

7. Москвин Б.В. Теория принятия решений: учебник. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2005. – 385 с.

8. Корбут А.А., Финкельштейн Ю.Ю. Дискретное программирование. – М.: Наука, 1969. – 368 с.

9. Рыбников К.А. Введение в комбинаторный анализ. – 2-е изд. – М.: Изд-во МГУ, 1985. – 309 с.

10. Ануфриенко С.А. Введение в теорию множеств и комбинаторику: учеб. пособие. – Екатеринбург: УрГУ, 1998. – 62 с.

11. Киселев В.Д. Методы и алгоритмы решения задач целочисленного квадратичного программирования на основе линеаризации целевой функции // Известия Тульского гос. ун-та. Технические науки. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. – Вып. 11, ч. 1. – С. 402–411.

12. Программный комплекс моделирования космических сил и средств / А.В. Чарушников, П.А. Проценко, М.Ю. Ортиков и др. // Наука и инновации в технических университетах: материалы Девятого Всероссийского форума студентов, аспирантов и молодых ученых. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. – С.64–66.

Р.С. Хабаров

МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ НАЗНАЧЕНИЯ СМЕШАННЫХ ПРИОРИТЕТОВ В СЕТИ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ С МНОГОКАНАЛЬНЫМИ УЗЛАМИ

Представлен метод назначения смешанных приоритетов в неэкспоненциальной сети массового обслуживания (СеМО). Предполагается, что СеМО в общем случае имеет многоканальные узлы с различными распределениями времени обслуживания между классами. Расчет временных характеристик узлов сети осуществляется на основе идеи инвариантов отношения, которая заключается в применении символической пропорции между показателями узлов сети. Создана программная реализация предложенного метода.

Ключевые слова: сети массового обслуживания, оптимизация сетей массового обслуживания, многоканальные системы, приоритетное обслуживание, смешанные приоритеты, инварианты отношения.

ВВЕДЕНИЕ

На этапе проектирования сложных систем для обоснования характеристик их производительности используются сети массового обслуживания [1]. Особое значение модели СеМО имеют при анализе функционирования специализированных центров обработки данных военного назначения (ЦОД ВН), к работе которых предъявляются высокие требования по оперативности решаемых задач.

Отметим некоторые особенности функционирования ЦОД ВН, требующие учета при моделировании.

1. Поступающие в такие системы информационно-расчетные задачи (ИРЗ), как правило, различаются по важности, трудоемкости, а также по требованиям оперативности их обработки, что приводит к необходимости введения приоритетных дисциплин обслуживания.

2. Организация процесса обработки ИРЗ в ЦОД ВН предполагает распараллеливание вычислений, поэтому для анализа таких систем необходимо использовать СеМО с многоканальными узлами.

3. Считается, что предположение об экспоненциальном времени обслуживания задач для большинства реальных систем неверно.

Таким образом, для анализа процесса обработки ИРЗ в ЦОД ВН следует использовать модели неэкспоненциальных СеМО с многоканальными узлами и приоритетными дисциплинами обслуживания.

Расчет вероятностно-временных характеристик указанных сетей связан с определенными сложностями. Наличие приоритетов в многоканальных узлах с неэкспоненциальным распределением времени обслуживания приводит к невозможности применения теоремы авторов *F. Baskett, K. Chandy, R. Muntz, J. Palacios* (BCMP) [2]. Альтернативой является метод потокоэквивалентной декомпозиции, однако в данном случае требуется способ расчета многоканальных узлов с приоритетами. Несмотря на то, что для одноканальных систем массового обслуживания (СМО) с приоритетами методы расчета представлены в многочисленных работах [3–6], нахождение точного решения для многоканального случая до сих пор не получено.

В большинстве работ по многоканальным СМО с приоритетами исследуются модели с экспоненциальным обслуживанием $M/M/n$ [7–10]. В статье [11] представлены аппроксимации для средних времен ожидания СМО вида $M/D/n$ с относительным приоритетом.

Моделям с неэкспоненциальным распределением времени обслуживания посвящены работы [12–17], где в [12–14] рассматривается случай распределений времен обслуживания,

идентичных для каждого класса заявок. В работах [15 и 16] представлен метод численного расчета для многоканальных СМО с абсолютным и относительным приоритетами, основанный на аппроксимации периода полной непрерывной занятости. Получены решения для следующих случаев:

- время обслуживания заявок для всех классов распределено по экспоненциальному закону;
- время обслуживания одного класса является произвольным и аппроксимируется гиперэкспоненциальным распределением второго порядка, а другого – по экспоненциальному закону.

В статье [17] предложен метод расчета многоканальных СМО с относительным и абсолютным приоритетами на основе идеи инвариантов отношения, которая заключается в применении символической пропорции между показателями систем массового обслуживания некоторых классов. В данной работе приводится расчет для более общего случая смешанных приоритетов. Введение смешанных приоритетов особенно актуально при большом количестве классов, поскольку позволяет достичь значительную дифференциацию оперативности обслуживания заявок.

Полученные на основе метода инвариантов отношения времена пребывания заявок в узлах используются для дальнейшего расчета сети в целом. По найденным моментам времени пребывания заявок в сети можно получить аппроксимацию дополнительных функций распределения времен пребывания для каждого из типов заявок и оценить вероятности превышения требуемых значений.

Предварительный анализ функционирования системы на основе модели предложенной СеМО может показать, что времена обработки некоторых типов задач выходят за рамки заданных ограничений. В сложившейся ситуации возможны следующие варианты решений:

- увеличение числа каналов в наиболее загруженных узлах (количества серверов обработки, виртуальных машин);
- повышение быстродействия обработки в каналах (улучшение технических характеристик серверов, увеличение количества ядер процессоров, количества оперативной памяти и т. д.);
- совершенствование организации обработки.

Первые два пункта, с одной стороны, тривиальны, с другой стороны, требуют дополнительных финансовых затрат. К тому же, в отличие от других центров обработки данных, для ЦОД ВН существуют ограничения, связанные с уровнем секретности обрабатываемых данных. Это приводит к невозможности наращивания ресурсов за счет «облачных» решений, когда необходимые вычислительные мощности предоставляются за определенную плату по требованию.

Современные технологии позволяют:

- управлять маршрутизацией потоков;
- гибко выделять и перераспределять ресурсы в ходе вычислений;
- вводить приоритеты при обработке задач.

Подходы к оптимизации маршрутов потоков в вычислительных сетях представлены в работах [18–21]. Однако маршрут обработки ИРЗ в ЦОД ВН, как правило, задан технологией обработки и не предполагает возможности гибкого изменения.

Подходы, основанные на гибком выделении и перераспределении ресурсов, имеют ряд существенных недостатков, главный из которых – значительные временные затраты на операции перераспределения ресурсов. Например, для осуществления «живой» миграции виртуальной машины (ВМ) с объемом дисков 10 Гб и оперативной памяти 1 Гб требуется около одного часа, с 20 Гб данных дисков – более трех часов [22].

Учитывая отмеченные выше особенности, в данной работе предлагается использовать способ гибкого управления приоритетами ИРЗ.

Существующие в настоящее время подходы к оптимизации приоритетов [23–25] имеют следующие недостатки:

1. Приоритеты рассматриваются на уровне отдельных СМО. Как будет показано далее, при назначении приоритетов в СеМО сохранение варианта расстановки приоритетов для всех узлов приводит к неудовлетворительным показателям оперативности для классов с низшими приоритетами. Это вызвано тем, что эффекты назначения приоритетов для каждого из узлов сети, заключающиеся в уменьшении времени пребывания одних классов заявок за счет других, суммируются. Необходимо разработать способ назначения приоритетов, обеспечивающий гибкое управление оперативностью обработки заявок в сети.

2. В качестве исходных данных для оптимизации используются штрафы за ожидание в очереди [23, 25]. В случае обработки ИРЗ в ЦОД ВН данный подход практически неприменим, поскольку потребует обосновать величины штрафов за ожидание на каждом из этапов обработки. В качестве исходных данных для обработки ИРЗ в ЦОД ВН, согласно ГОСТ РВ 51987-02 [26], выступают не штрафы, а вероятность того, что время обработки не превысит директивно заданное время.

3. Рассматриваемые модели СМО являются одноканальными. На практике отдельные этапы обработки ИРЗ в ЦОД ВН осуществляются на некотором наборе вычислительных узлов (виртуальных машин), соответственно, они должны быть представлены многоканальными СМО.

В настоящей работе предложен метод оптимизации назначения смешанных приоритетов в узлах неоднородной СеМО. Узлы сети в общем случае являются многоканальными. Времена обслуживания характеризуются распределением общего вида и отличаются по типам заявок. Предполагается, что в виде ограничений для каждого типа ИРЗ заданы вероятности невышления времени обработки директивных сроков.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ НАЗНАЧЕНИЯ ПРИОРИТЕТОВ СЕТИ

Рассмотрим процесс обработки ИРЗ в ЦОД ВН в виде СеМО, где типы обрабатываемых задач представляют собой заявки сети. Поступающие задачи являются комплексными, т. е. предполагают ряд этапов обработки. Для каждого из этапов обработки задано количество выделенных унифицированных вычислительных узлов (ВУ) с предустановленным СПО для каждого типа обрабатываемых данных. Для каждой из поступающих задач заданы требования по своевременности обработки в виде вероятности того, что задача будет обработана за директивно заданное время.

Перейдем к математической постановке задачи. Будем считать, что на вход разомкнутой сети, состоящей из M узлов, поступает K типов заявок. Для j -го узла сети задано число каналов n_j . Для каждого типа заданы:

– начальные моменты распределения времени обслуживания в каждом из узлов $\{b_{j,l}^k\}, l = \overline{1, L}, k = \overline{1, K}, j = \overline{1, M}$;

– матрица передач $R^k = \{r_{i,j}^k\}$, определяющая маршрут заявки k -го типа в сети и характеризующая вероятности переходов из i -го узла в j -й узел;

– интенсивность поступления заявок в сеть $L^k, k = \overline{1, K}$;

– ограничения на вероятность невышления требуемого времени пребывания $P_{\text{преб}}^k (T^k < T_{\text{преб}}^k)$.

Введем комплексный показатель оперативности обработки ИРЗ в ЦОД ВН в виде

$$G = 1 - D_{\text{но}}^{\text{сумм}}, \quad (1)$$

где $D_{\text{но}}^{\text{сумм}} = \sum_{k=1}^K D_{\text{но}}^k \cdot \lambda_k / \Lambda$. В формуле (1) введены следующие обозначения:

$D_{\text{но}} = \max\{0, P_{\text{треб}} - P_{\text{реал}}\}$ – доля задач, обработка которых превысит директивно заданное время;

λ_k – интенсивность поступления k -го типа задач;

$\Lambda = \sum_{k=1}^K \lambda_k$ – интенсивность суммарного потока поступающих задач.

Обозначим вариант назначения смешанного приоритета в узле кортежем из двух чисел:

$$\{X_i^k\} = \langle PR_i^k, NP_i^k \rangle, i = \overline{1..M},$$

где PR_i^k, NP_i^k являются значениями абсолютного и относительного для k -го типа в i -м узле приоритетов соответственно. Значения приоритетов нумеруются, начиная с единицы. Чем ниже приоритет типа заявки в узле, тем больше значение. В исходном состоянии в узлах сети дисциплина обслуживания FCFS и без приоритетов, что соответствует единичным значениям для PR и NP для всех типов по всем узлам.

Требуется найти множество вариантов назначения смешанных приоритетов по узлам сети $\{X_i^k\}$, при котором обеспечивается максимум комплексного показателя оперативности:

$$\{X_i^k\}^* = \arg \max_{X_i^k \in X} G(P_{\text{треб}}^k, T_{\text{треб}}^k, \lambda_k, \{b_{j,l}^k\}, R^k, n_j, \{X_i^k\}), l = \overline{1..L}, k = \overline{1..K}, j = \overline{1..M}.$$

РАСЧЕТ СЕТИ С МНОГОКАНАЛЬНЫМИ УЗЛАМИ И СМЕШАННЫМ ПРИОРИТЕТОМ

В статье [16] предложен метод расчета многоканальных систем массового обслуживания (СМО) с абсолютным и относительным приоритетами на основе идеи инвариантов отношения между искомыми характеристиками:

$$\overrightarrow{M}_k / \overrightarrow{G}_k / n \approx \overrightarrow{M}_k / \overrightarrow{G}_k / 1 \cdot \frac{M/G/n}{M/G/1}. \quad (2)$$

В выражении (2) обозначения приведены в нотации Кендалла. Методы расчета систем, указанных в правой части, считаются известными. В частности, для расчета систем $M/G/n$ применяются итерационные методы Такахаси – Таками или матрично-геометрической прогрессии [27–29]. В качестве аппроксимации времени обслуживания предлагается использовать гиперэкспоненциальное распределение второго порядка H_2 , применимое для значений коэффициента вариации, как меньших, так и больших единицы.

Расчет начальных моментов времени пребывания j -го класса заявок в одноканальной СМО со смешанным приоритетом будем производить дифференцированием соответствующих преобразований Лапласа – Стильтеса (ПЛС), приведенных в работе [25].

Особенностью расчета СеМО с различными назначениями приоритетов в узлах является необходимость запоминания соответствия номеров исходных типов заявок и номеров классов заявок в конкретных узлах. При переходе от отдельных узлов к расчету сети в целом полученные моменты времен пребывания классов в узлах необходимо соотнести с исходным порядком типов заявок, поступающих в сеть.

Метод расчета распределения времени пребывания по всем типам заявок сети состоит из следующих этапов:

1. Решить систему уравнений баланса по каждому типу заявок k относительно средних интенсивностей потоков в узлах:

$$\lambda_i^k = L^k \cdot r_{0,i}^k + \sum_{j=1}^M \lambda_j^k \cdot r_{i,i}^k, \quad i = \overline{1, M}.$$

2. Для всех узлов проверить условие отсутствия перегрузки:

$$\frac{\Lambda_i \cdot \sum_{k=1}^K b_{i,1}^k / K}{n_i} < 1 \quad i = \overline{1, M},$$

Выполнение данного условия обеспечивает существование стационарного режима в сети.

3. Рассчитать время пребывания в каждом узле $i = \overline{1, M}$ на основе метода инвариантов отношений с использованием формулы (2) для нахождения моментов времени пребывания в одноканальном узле со смешанным приоритетом.

4. Поскольку ограничения заданы в виде вероятностей, необходим расчет высших моментов времен пребывания в сети для каждого типа заявок $k = \overline{1, K}$. Для этого из матрицы передач выделим:

– вектор-строку $P^k = \{r_{0,1}^k, r_{0,2}^k, \dots, r_{0,M}^k\}$ вероятностей перехода из источника в конкретные узлы;

– вектор-столбец $T^k = \{r_{1,M+1}^k, r_{2,M+1}^k, \dots, r_{M,M+1}^k\}$ вероятностей перехода из рабочих узлов в сток;

– матрицу $Q^k = \{r_{i,j}^k\}$, $i, j = \overline{1, M}$, вероятностей переходов между рабочими узлами.

Кроме того, определим диагональную матрицу $N^k(s)$ ПЛС $\{v_i(s)\}$ распределений времени пребывания в рабочих узлах сети и сформируем матрицу $\Gamma^k(s) = N^k(s)Q^k$. Тогда полное ПЛС распределения времени пребывания заявки в сети для типа k будет следующим:

$$\gamma^k(s) = P(I - \Gamma(s))^{-1} N(s)T.$$

Начальные моменты $\{g_i^k\}$ распределения времени пребывания в сети можно получить численным дифференцированием $\{\gamma^k(s)\}$ в нуле. Далее по найденным моментам для каждого типа заявок определяются дополнительная функция распределения ДФР времени пребывания заявки в сети (например, аппроксимацией ДФР Вейбулла с поправочным многочленом), соответствующая вероятности неперевышения требуемого времени обработки, и комплексный показатель оперативности по формуле (1).

МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ НАЗНАЧЕНИЯ ПРИОРИТЕТОВ В УЗЛАХ СЕТИ

Предварительные соображения по числу возможных вариантов расстановки приоритетов в узлах сети свидетельствуют о нецелесообразности использования метода прямого перебора. Предложенный метод работает в направлении уменьшения приоритетов других типов относительно типа заявок, имеющего наибольшую разницу между требуемой вероятностью неперевышения заданного времени и вероятностью, полученной в результате расчета на текущем шаге. Переназначение приоритетов для найденного типа заявок происходит в узле с максимальным временем пребывания. Метод работает итерационно до тех пор, пока не будут выполнены все ограничения на вероятности неперевышения требуемых значений.

На рис. 1 представлена схема метода назначения приоритетов в узлах СеМО, программно реализованного на языке С#.

Метод состоит из следующих шагов:

Шаг 1. Назначение всем типам заявок одинаковых абсолютных и относительных приоритетов, равных единице. При таком варианте по сути осуществляется беспriorитетное обслуживание.

Шаг 2. Расчет СеМО описанным выше методом.

Шаг 3. Проверка выполнения требований: $\forall k \ P^k (T^k < T_{\text{треб}}^k) < P_{\text{треб}}^k$. В случае выполнения требований для всех типов заявок осуществляется переход на шаг 4, если нет – на шаг 5.

Шаг 4. Выполнение вывода найденного варианта назначения приоритетов.

Шаг 5. Поиск типа заявок с максимальной разницей между требуемыми и полученными значениями. Типы заявок, входящие в множество K_{opt} , во время поиска игнорируются.

Шаг 6. Поиск узла с максимальным временем пребывания. Узлы, входящие в множество $M_{\text{opt}}^{k \text{ max}}$, во время поиска игнорируются.

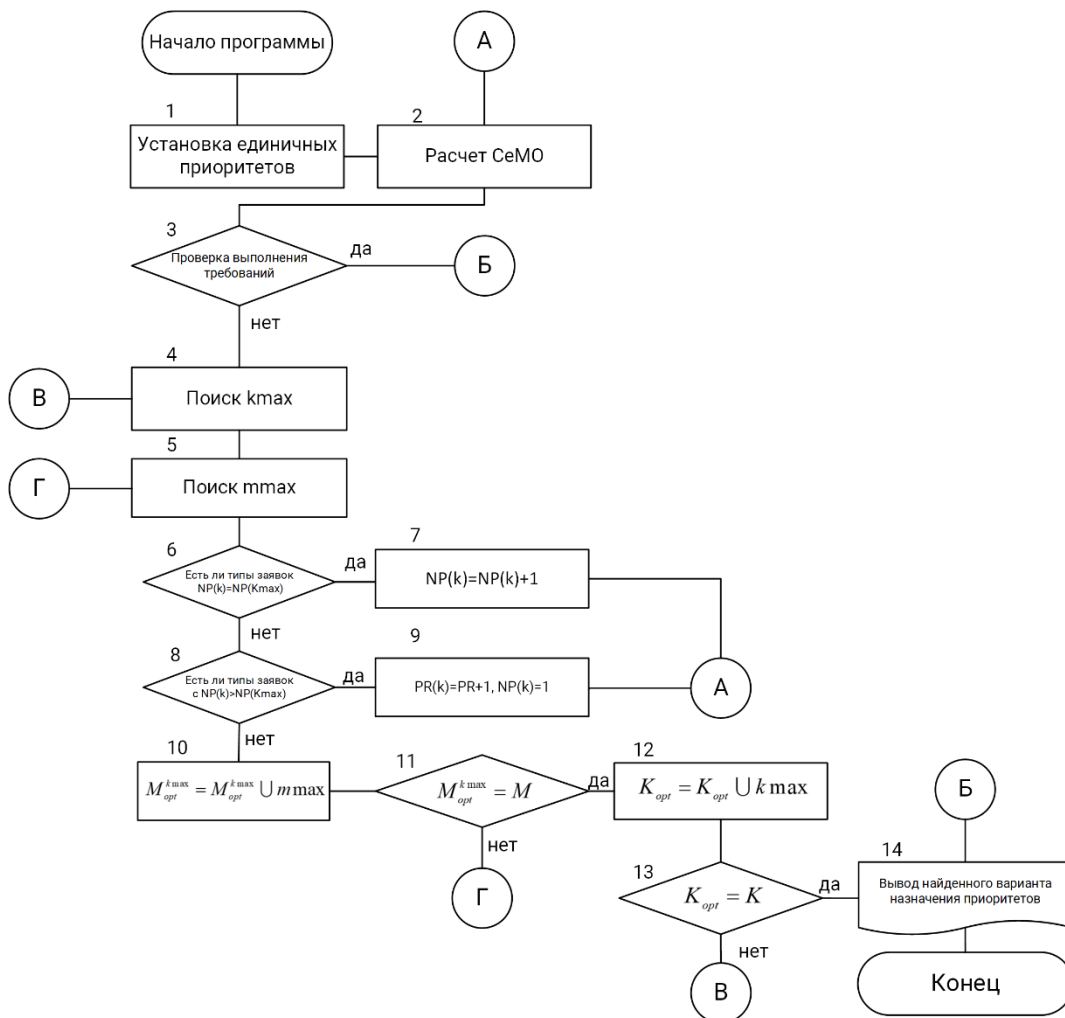


Рис. 1. Метод назначения смешанных приоритетов в узлах СеМО

Шаг 7. Поиск заявок с относительным приоритетом, соответствующим приоритету заявок типа $kmax$ в узле $mmax$ в пределах абсолютного класса, увеличение относительного приоритета которых не приведет к превышению ими заданных требований по времени пребывания в сети. Поиск по типам осуществляется в порядке убывания максимума разности между требуемой и полученной в результате расчета сети вероятностями превышения директивно заданного времени. Если найден тип, удовлетворяющий данным условиям, происходит переход на шаг 8. Если нет – на шаг 9.

Шаг 8. Для найденного на шаге 7 типа происходит увеличение относительного приоритета на единицу в пределах текущего абсолютного приоритета и переход на шаг 2.

Шаг 9. Поиск заявок с номером относительного приоритета, большим номера приоритета заявок типа k_{max} в узле m_{max} в пределах текущего абсолютного приоритета. Если найдены типы заявок, удовлетворяющие данным условиям, происходит запоминание их номеров и переход на шаг 10. Если нет – на шаг 11.

Шаг 10. Для найденных на шаге 9 типов заявок осуществление увеличения абсолютного приоритета на единицу. Относительный приоритет присваивается равным единице. Далее происходит переход на шаг 2.

Шаг 11. Включение узла m_{max} в множество оптимизированных для типа заявок k_{max} .

Шаг 12. Проверка на совпадения множеств узлов, оптимизированных для типа k_{max} , с множеством всех узлов M . Если указанные множества не совпадают, для класса k выбирается следующий узел. В противном случае осуществляется переход на шаг 13.

Шаг 13. Включение типа k_{max} в множество оптимизированных типов заявок.

Шаг 14. Проверка на совпадения множеств оптимизированных типов с множеством всех типов K . Если указанные множества не совпадают, происходит вывод полученного результата. В противном случае выбирается другой тип заявок.

ПРИМЕР РАСЧЕТА И ОПТИМИЗАЦИИ СЕТИ

Предположим, что ЦОД ВН обрабатывает $K = 9$ типов задач, распределение времени обслуживания которых задано тремя начальными моментами (табл. 1). Для наглядности интенсивности поступления и начальные моменты выбирались одинаковыми для всех типов заявок и узлов. Количество узлов обработки $M = 8$. Распределение числа каналов по узлам задано следующим кортежем: $\langle 3, 2, 3, 2, 3, 2, 1, 3 \rangle$.

Таблица 1

Исходные данные

Интенсивности входных потоков L_k	Начальные моменты времени обслуживания		
	b_1^k	b_2^k	b_3^k
0,30	1,00	2,54	10,4

$$\begin{pmatrix} 1.0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.15 & 0.35 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.3 & 0.7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.4 & 0.6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0 & 0 \end{pmatrix}$$

а)

$$\begin{pmatrix} 1.0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.4 & 0.2 & 0.4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.4 & 0.6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.4 & 0.6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0 & 0 \end{pmatrix}$$

б)

$$\begin{pmatrix} 1.0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.7 & 0.15 & 0.15 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.7 & 0.3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.7 & 0.3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0 & 0 \end{pmatrix}$$

в)

Рис. 2. Маршрутные матрицы:

а – для заявок типов 1, 4 и 7; б – для заявок типов 2, 5 и 8;

в – для заявок типов 3, 6 и 9

На рис. 2 представлены маршрутные матрицы для всех типов заявок.

При таких исходных данных коэффициенты загрузки узлов составили 0,9; 0,72; 0,15; 0,41; 0,31; 0,68; 0,41; 0,9 соответственно. В табл. 2 приведены результаты расчета (P) с помощью

рассмотренного ранее метода в сравнении с результатами имитационного моделирования (ИМ) для случая трех классов абсолютного приоритета и трех относительных приоритетов в каждом абсолютном для всех узлов сети.

Таблица 2

Результаты расчета и ИМ

№ типа	Сравнение ИМ с Р	Начальные моменты распределения времени пребывания в СеМО			№ типа	Сравнение ИМ с Р	Начальные моменты распределения времени пребывания в СеМО			№ типа	Сравнение ИМ с Р	Начальные моменты распределения времени пребывания в СеМО		
		1	2	3			1	2	3			1	2	3
1	ИМ	4,177	23,84	172,5	4	ИМ	5,151	39,28	415,3	7	ИМ	9,352	141,0	3,14e3
	Р	4,369	25,70	189,8		Р	5,514	40,93	382,0		Р	9,818	150,3	3,15e3
	$\delta, \%$	4,4	7,2	9,1		$\delta, \%$	6,6	4,0	8,7		$\delta, \%$	4,7	6,1	0,38
2	ИМ	4,203	24,23	177,6	5	ИМ	5,696	48,84	582,3	8	ИМ	13,89	350,4	1,46e4
	Р	4,412	26,29	197,0		Р	5,817	46,96	485,9		Р	13,42	334,4	1,26e4
	$\delta, \%$	4,7	7,8	9,9		$\delta, \%$	2,1	4,0	19,8		$\delta, \%$	3,6	4,8	15,8
3	ИМ	4,209	24,29	177,9	6	ИМ	6,551	67,61	1,00e3	9	ИМ	29,75	1,96e3	2,36e5
	Р	4,451	26,82	203,5		Р	6,333	58,59	715,5		Р	27,58	1,84e3	2,04e5
	$\delta, \%$	5,4	9,4	12,5		$\delta, \%$	3,4	15,4	39,9		$\delta, \%$	7,9	6,2	15,5

В соответствии с работой [30] для оценок первого момента допустима погрешность в 20%, второго – 40%, а третьего – 60%. Полученные расчетные значения не превысили этих значений ограничений. Наибольшая погрешность в оценке значений начальных моментов времени пребывания наблюдается для заявок с низшими приоритетами.

В табл. 3 представлены требования для каждого из типов заявок, а также рассчитанные значения указанных вероятностей и средних времен пребывания до и после оптимизации. Приведены рассчитанные значения $D_{\text{но}} = \max\{0, P_{\text{треб}} - P_{\text{реал}}\}$.

Таблица 3

Результаты расчета до и после оптимизации

Параметры		Номер типа заявки								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Требуемые значения	$T_{\text{треб}}^k$	8,00	9,00	10,00	15,00	15,00	18,00	22,00	40,00	65,00
	$P_{\text{треб}}^k$	0,120	0,150	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200
До оптимизации	T_1^k	19,53	19,29	19,42	19,53	19,30	19,42	19,53	19,30	19,42
	$P_{\text{реал}}^k$	0,832	0,793	0,762	0,589	0,580	0,482	0,364	0,061	0,002
	$D_{\text{но}}^k$	0,712	0,643	0,562	0,389	0,38	0,282	0,164	0	0
После оптимизации	T_1^k	4,72	4,72	5,27	7,76	7,48	7,65	7,63	21,12	21,25
	$P_{\text{реал}}^k$	0,119	0,072	0,085	0,087	0,076	0,035	0,010	0,153	0,050
	$D_{\text{но}}^k$	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Как видно из предварительного расчета, для заявок типов 1–7 вероятности превышения заданного времени пребывания до оптимизации не укладываются в предъявленные требования, тогда как для заявок типов 8 и 9 имеется запас по оперативности. Для заявок типов 1–3 ситуация особенно критичная – с вероятностями 0,832; 0,793 и 0,762 соответственно, время пребывания превысит требуемое. Рассчитанный по формуле (1) комплексный показатель

оперативности составил $G = 0,652$. После оптимизации требования для всех заявок выполнены, что соответствует комплексному показателю оперативности $G = 1,0$. Расчет относительного прироста комплексного показателя, по сравнению с беспriorитетным обслуживанием, составил около 35%.

В результате применения метода для заявок определены варианты приоритетов, указанные в табл. 4. Приоритеты обозначены кортежем из двух чисел, на первом месте которого номер абсолютного приоритета в узле, а на втором – номер относительного.

Таблица 4

Назначение приоритетов в результате оптимизации сети

Номер узла	Номер типа заявки								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2	2,1	2,1
2	1,1	1,1	1,2	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1
3	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
4	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2
5	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
6	1,1	1,2	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1
7	1,1	1,1	2,1	2,1	2,1	1,2	2,1	2,1	2,1
8	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2	2,1	2,1

Как видно из таблицы, назначение приоритетов произошло преимущественно в узлах с высоким коэффициентом загрузки. Для типа 1, как и следовало ожидать, приоритет наивысший.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод назначения приоритетов в узлах СеМО позволяет при заданных ограничениях на времена пребывания заявок сети получить назначение смешанных приоритетов по узлам, удовлетворяющее требованиям. Метод реализован программно на С# и может быть использован в специальном программном обеспечении управлением обработкой информации в ЦОД ВН для повышения оперативности решаемых задач.

Список используемых источников

1. Макаренко С.И. Анализ математического аппарата расчета качества обслуживания информационно-вычислительной сети на сетевом уровне эталонной модели взаимодействия открытых систем // VII Всероссийская конференция молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям. – 2006. – URL: <http://www.ict.nsc.ru/ws/YM2006/10566/article.htm> (дата обращения: 20.11.2019).
2. Open, Closed, and Mixed Networks of Queuing with Different Classes of Customers / F. Baskett, K. Chandy, R. Muntz, J. Palacios // J. of the ACM. – 1975. – Vol. 22, № 2. – P. 248–260.
3. Бронштейн О.И., Духовный И.М. Модели приоритетного обслуживания в информационно-вычислительных системах. – М.: Наука, 1976. – 220 с.
4. Климов Г.П. Стохастические системы обслуживания. – М.: Наука, 1966. – 276 с.
5. Конвей Р.В., Максвелл В.Л., Миллер Л.В. Теория расписаний: пер. с англ. – М.: Наука, 1975. – 359 с.

6. Гнеденко Б.В., Даниелян Э.А., Димитров Б.Н. Приоритетные системы обслуживания. – М.: МГУ, 1973. – 447 с.
7. *Buzen J., Bondi A.* Response times of priority classes under preemptive resume in M/M/m queues // *Operations Research*. – 1983. – № 31(3). – P. 456–465.
8. *Kella O., Yechiali U.* Waiting times in the non-preemptive priority M/M/c queue // *Stochastic Models*. – 1985. – № 1(2). – P. 257–262.
9. *Sleptchenko A., van Harten, van der Heijden M.C.* An Exact Solution for the State Probabilities of the Multi-Cass, Multi-Server Queue with Preemptive Priorities // *Queueing systems*. – 2005. – № 1. – P. 81–108.
10. *Zeltyn S., Feldman Z., Wasserfrug S.* Waining and sojourn times in a multi-server queue with mixed priorities // *Queueing Systems*. – 2009. – № 61(4). – P. 305–328.
11. *Altinkemer K., Bose I., Pal R.* Average waiting time of customers in an M/D/k queue with nonpreemptive priorities // *Computers & Operations Research*. – 1998. – № 25(4). – P. 317–328.
12. *Harchol-Balter M., Osogami T., Schelter-Wolf A., Wierman A.* Multi-server queueing systems with multiple priority classes // *Queueing Systems*. – 2005. – № 51(3). – P. 331–360.
13. *Wagner D.* Analysis of mean values of a multi-server model with non-preemptive priorities and non-renewal input // *Stochastic Models*. – 1997. – № 13(1). – P. 67–84.
14. *Williams T.* Nonpreemptive multi-server priority queues // *Journal of the Operational Research Society*. – 1980. – P. 1105–1107.
15. *Хомоненко А.Д.* Вероятностный анализ приоритетного обслуживания с прерываниями в многопроцессорных системах // *Автоматика и вычислительная техника*. – 1990. – № 2. – С. 55–61.
16. *Хомоненко А.Д.* Анализ производительности многопроцессорных систем при приоритетном обслуживании неоднородных потоков запросов // *Автоматика и вычислительная техника*. – 1991. – № 4. – С. 55–64.
17. *Рыжиков Ю.И., Хомоненко А.Д.* Расчет многоканальных систем обслуживания с абсолютным и относительным приоритетами на основе инвариантов отношения // *Интеллектуальные технологии на транспорте*. – 2015. – № 2. – С. 55–61.
18. *Листопад Н.И.* Маршрутизация информационных потоков при многокритериальных требованиях // *Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники*. – 2019. – № 3 (121) . – С. 51–56.
19. *Листопад Н.И., Хайдер А.А., Михневич С.Ю.* Сервис-ориентированный подход для оптимальной маршрутизации информационных потоков в мультисервисных сетях // *Системный анализ и прикладная информатика*. – 2015. – № 1. – С. 24–29.
20. *Рыжиков Ю.И.* Оптимизация маршрутной матрицы в сетях обслуживания // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. – 2014. – № 11(57) . – С. 15–19.
21. *Трухан А.В.* Модели обеспечения заданного качества обслуживания в сетях телекоммуникаций // *Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники*. – 2009. – № 8 (46) . – С. 101–107.
22. *Алексанков С.М.* Модель динамической миграции виртуальных машин с гибридным подходом // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. – 2017. – № 4. – С. 725–732
23. *Уорэнд Д.* Введение в теорию сетей массового обслуживания: пер. с англ. – М.: Наука, 1983. – 384 с.
24. *Чекменев В.А., Чекменева Т.Д.* Многокритериальная оптимизация приоритетных систем обслуживания, функционирующих в условиях конкуренции входящих потоков // *Вестник Кемеровского государственного университета*. – 2014. – № 1 (57). – С. 55–59.
25. *Рыжиков Ю.И.* Алгоритмический подход к задачам массового обслуживания: моногр. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2013. – 496 с.

26. ГОСТ РВ 51987-02. Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Типовые требования и показатели качества функционирования информационных систем. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 53 с.

27. Рыжиков Ю.И. Алгоритм расчета многоканальной системы с эрланговским обслуживанием // Автоматика и телемеханика. – 1978. – №4. – С. 87–91.

28. Рыжиков Ю.И., Хомоненко А.Д. Итеративный метод расчета многоканальных систем с произвольным распределением времени обслуживания // Проблемы управления и теория информации. – 1980. – № 3. – С. 32–38.

29. Takahashi Y., Takami Y. A numerical method for the steady-state probabilities of a GI/G/c queuing system in a general class. // J. of the Operat. res. soc. of Japan. – 1976. – Vol. 19, № 2. – P. 147–157.

30. Вишневецкий В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. – М.: Техносфера, 2003. – 512 с.

А.Н. Абакумов,
кандидат техн. наук;
И.Ю. Еремеев,
доктор техн. наук, профессор;
Е.П. Кадуков

МОДЕЛЬ РАДИОСИГНАЛОВ С МОДУЛЯЦИЕЙ С НЕПРЕРЫВНЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ ФАЗЫ ЗАРУБЕЖНЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ В ПРОСТРАНСТВЕ ПАРАМЕТРОВ ФАЗОВЫХ ДИАГРАММ

В статье рассмотрены вопросы построения модели радиосигналов с модуляцией с непрерывным изменением фазы в зарубежных спутниковых системах связи (ССС) на основе классификации параметров фазовых диаграмм (ФД). Рассмотрены условия, при которых достигается требуемая точность оценок параметров фазовой диаграммы и как итог – обеспечивается достоверность распознавания классов сигналов.

Ключевые слова: радиосигналы с модуляцией с непрерывным изменением фазы, фазовые диаграммы.

ВВЕДЕНИЕ

Тенденции развития технологии передачи информации в зарубежных современных ССС направлены на повышение помехоустойчивости и эффективности передачи информации. С этой целью применяются новые виды модуляции, обеспечивающие повышение пропускной способности каналов связи, снижение влияния помех в каналах и повышение эффективности использования радиочастотного ресурса [1]. К числу таких видов модуляции относятся сигналы с модуляцией с непрерывной фазой (СМНФ) (СРМ – Continuous Phase Modulation).

Многообразие видов модуляции сигналов зарубежных ССС с течением времени неуклонно расширяется, что обуславливает относительно высокую степень параметрической неопределенности анализируемых радиосигналов.

Кроме того, в современных системах связи и передачи данных вид манипуляции может меняться от сеанса к сеансу передачи информации. Данное обстоятельство ограничивает информационный доступ к каналам связи и приводит к потере информации. Таким образом, имеет место противоречие между большим многообразием видов и параметров модуляции, с одной стороны, и возможностями по их обработке – с другой.

Используемые в современных системах радиомониторинга методы распознавания видов манипуляции радиосигналов достаточно хорошо разработаны применительно к сигналам с традиционными видами модуляции, но не позволяют устранить неопределенность вида и параметров манипуляции для широкого класса СМНФ. Для автоматического распознавания и оценивания параметров СМНФ с требуемым качеством на первоначальном этапе целесообразно построить модель радиосигналов с непрерывным изменением фазы зарубежных ССС в пространстве параметров ФД.

Цель работы, описанной в статье, состоит в выявлении и исследовании поведения признаков радиосигналов с непрерывным изменением фазы в фазовое пространство для распознавания классов сигналов с требуемой достоверностью.

ПРИНЦИПЫ ПРИМЕНЕНИЯ ГЛАЗКОВЫХ ДИАГРАММ ДЛЯ ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ РАДИОСИГНАЛОВ С НЕПРЕРЫВНЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ ФАЗЫ ЗАРУБЕЖНЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ

Для создания теоретической базы исследования СМНФ воспользуемся обобщенной математической моделью радиосигнала [2]:

$$u(t) = U_0 \cdot \cos[\omega_0 \cdot t + \varphi_M(t, a_i) + \varphi_0], t \in [0, T_{\text{набл}}], \quad (1)$$

где $\varphi_M(t, a_i)$ – модуляционная составляющая фазы сигнала;

φ_0 – начальная фаза сигнала;

U_0 – амплитуда сигнала;

ω_0 – несущая круговая частота, где $\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_0$;

f_0 – несущая частота сигнала;

a_i – последовательность информационных символов, выбранных из алфавита

$$a_i \in \{\pm 1, \pm 3, \dots, \pm(M-1)\}, i = \left\lfloor \frac{T_{\text{набл}}}{\tau_s} \right\rfloor;$$

$T_{\text{набл}}$ – интервал наблюдения;

τ_s – длительность элементарного импульса.

Непрерывность фазы заключается в гладкости фазовых траекторий, которые в тактовые моменты времени принимают значения, кратные πh :

$$\varphi_M(t, a_i) = 2 \cdot \pi \cdot h \sum_{i=k-L+1}^k a_i \cdot q(t-i \cdot T) \text{ при } k \cdot T \leq t \leq (k+1) \cdot T, \quad (2)$$

где $q(t)$ – фазовая характеристика, отражающая форму изменения фазы сигнала при действии единичного информационного символа из множества $\{a_i\}$ на интервале

$$0 < t < L \cdot T, \text{ где } q(t) = \int_0^t g(\tau) d\tau;$$

$g(t)$ – частотная характеристика элементарного символа, длительность которого равна $L \cdot T$;

k – целое число, $k = \left\lfloor \frac{T_{\text{набл}}}{T_{\text{ин}}} \right\rfloor, k \gg 1$;

L – число периодов передачи информационных символов длительностью T , на которые влияет отдельный информационный символ из множества $\{a_i\}$;

h – индекс модуляции.

Таким образом, полную фазу можно определить следующим образом:

$$\varphi(t, a_i) = 2 \cdot \pi \cdot h \sum_{i=k-L+1}^k a_i \cdot q(t-i \cdot T) + \varphi_0. \quad (3)$$

Для графического отображения изменения комплексной огибающей, фазы и частоты сигнала используются глазковые диаграммы (ГД), формируемые наложением собственных реализаций сигнала, сдвинутых относительно друг друга на интервал корреляции [3]. Реализации совмещаются по координате времени, образуя согласованно накопленный графический образ для сравнения элементов сигнала. Глазковые диаграммы отражают статистику взаимного распределения уровня – межсимвольную корреляцию формы импульсов и интервала изохронности. Диаграмма может быть статической при необновляемом графике или динамической, если состав реализаций обновляется.

При проведении измерений получили распространение три основных класса диаграмм, представленных на рис. 1, а именно [4]:

- диаграммы комплексной огибающей сигнала в виде диаграмм вещественной и мнимой составляющей [$\xi_{quad} = f_{oc}(Re_{u(t)}, Im_{u(t)})$];
- фазовые диаграммы [$\xi_{ph} = f_{oc}(\varphi(t, a))$];
- частотные диаграммы [$\xi_{fr} = f_{oc}(f_c(t))$].

Динамические ГД получаются на осциллографе в режиме ждущей развертки, синхронизируемой опорной тактовой частотой.

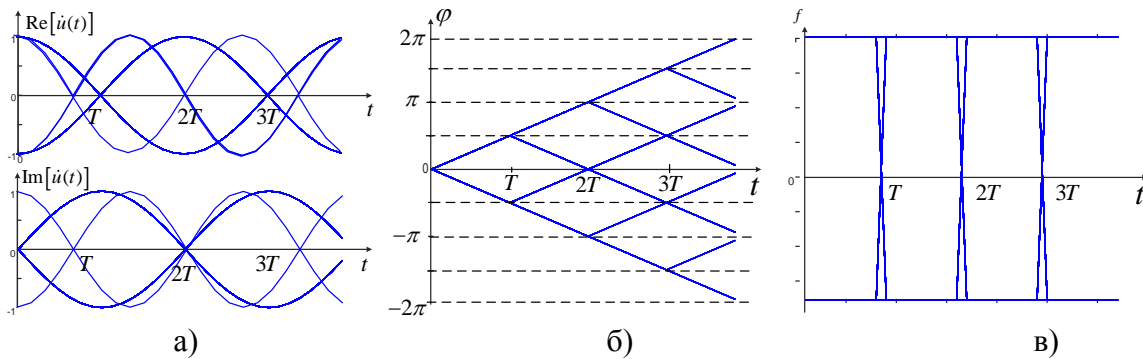


Рис. 1. Пример формирования ГД двухпозиционного СМНФ:
а – комплексной огибающей; б – фазы; в – частоты

Глазковая диаграмма позволяет обнаруживать и оценивать в сигнале [5]:

- свойства изохронности и дискретности (наличие глазка);
- форму импульсов (форма глазка);
- межсимвольную интерференцию;
- стабильность тактовой частоты относительно частоты опорного генератора.

Для дальнейшего анализа необходимо осуществить выбор класса глазковых диаграмм. С этой целью воспользуемся векторным представлением радиосигнала, представленного на рис. 2.

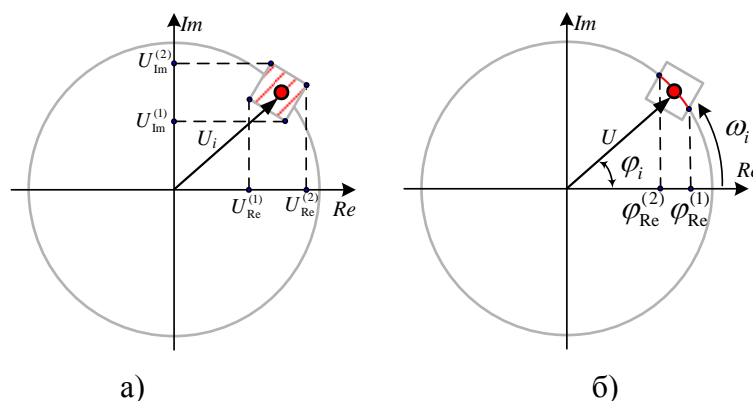


Рис. 2. Векторное представление изменения характеристик радиосигнала:
а – из комплексной огибающей; б – фазы

На основе анализа рис. 2 можно сделать вывод, что главным недостатком использования ГД, построенных по квадратурным компонентам комплексной огибающей сигнала, является чувствительность к началу нарезки φ_0 , а также повышенная вследствие влияния шумов на обе квадратуры шумовая составляющая. По сравнению с диаграммами комплексной огиба-

ющей сигнала фазовые диаграммы имеют преимущество по степени влияния шумов. Так, шумовая составляющая в два раза ниже, поскольку не учитывается изменение амплитуды. Исходя из проведенного анализа для построения модели излучений зарубежных ССС воспользуемся фазовыми диаграммами СМНФ.

В работе [6] предложено множество разнообразных параметров, которые могут быть использованы для описания фазовых траекторий в фазовом пространстве представления радиосигнала,

$$f_{\text{оц}}(\xi_{ph}) = \{x_{EL}, x_{EA}, x_{EH}, x_{VO}, x_{QF}, x_{CL}, x_{CR}, x_{ED}, x_{EW}, x_{HO}, x_{RT}, x_{FT}\}, \quad (4)$$

где $f_{\text{оц}}(\xi_{ph})$ – функция оценки параметров ФД;

x_{EL} – «глазковый уровень» (Eye Levels);

x_{EA} – «глазковая амплитуда» (Eye Amplitude);

x_{EH} – амплитуда «чистого глаза» (Eye Height);

x_{VO} – процентное соотношение «глазкового пересечения» (Vertical Opening);

x_{QF} – добротность (Quality Factor);

x_{CL} – амплитуда «глазкового пересечения» (Crossing Levels);

x_{CT} – период «глазкового пересечения» (Crossing Times);

x_{ED} – «глазковая задержка» (Eye Delay);

x_{EW} – ширина «чистого глаза» (Eye Width);

x_{HO} – горизонтальное «открытие глаза» (Horizontal Opening);

x_{RT} – время «глазкового нарастания» (Rise Time);

x_{FT} – время «глазкового затухания» (Fall Time).

В общем случае использование малоинформативных параметров при решении задач распознавания приводит к снижению надежности классификации [7]. Это связано с тем, что излишняя размерность пространства признаков значительно усложняет процесс расчета границ принятия решения о классе анализируемого объекта, а также требует применения более сложных моделей законов распределения многомерных случайных величин.

На основе рекомендаций Консультативного комитета по космическим системам передачи информации (CCSDS – Consultative Committee for Space Data System) сформирован алфавит классов, соответствующий СМНФ,

$$\Omega_{\text{МНФ}} = \{\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3, \Omega_4\}, \quad (5)$$

где Ω_1 – манипуляция с минимальным сдвигом с использованием фильтра низких частот (ФНЧ) Гаусса;

Ω_2 – частотно-манипулированные сигналы с непрерывным изменением фазы (ЧМнНФ);

Ω_3 – частотно-манипулированные сигналы с использованием ФНЧ типа «квадратный корень из приподнятого косинуса»;

Ω_4 – частотно-манипулированные сигналы с использованием ФНЧ Гаусса.

Отметим, что в априорном алфавите классов $\Omega_{\text{МНФ}}$ каждый класс представляет собой множество модификаций конкретного вида манипуляции, образованных различными формами элементарного импульса. При решении задачи распознавания к одному и тому же классу необходимо относить элементарные импульсы, образованные ФНЧ типа «квадратный корень из приподнятого косинуса» или Гаусса при различных значениях коэффициента скругления.

Для получения представительных выборок реализаций вектора значений параметров ФД $X_{\Omega_{\text{МНФ}}}$ в процессе моделирования определялись значения признаков априорного словаря при различных формах частотных импульсов, образующих радиосигналы СПИ соответствующих классов. То есть для каждого класса $\Omega_{\text{МНФ}}$ статистика набиралась для нескольких модификаций соответствующего обобщенного вида модуляции, представленных в табл. 1.

Таблица 1

Множество модификаций СМНФ, формирующих множество альтернатив распознавания

№	Класс	Форма элементарного импульса	Параметр	Значение параметра
1	Ω_1	Импульс, образованный ФНЧ Гаусса	BT	0,2; 0,25; 0,3; 0,5
2	Ω_2	Прямоугольный импульс	h	0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9
3	Ω_3	Импульс, образованный ФНЧ типа «корень квадратный из приподнятого косинуса»	h	0,25; 2/3
			α_{RRC}	0,3; 0,5
4	Ω_4	Импульс, образованный ФНЧ Гаусса	h	0,36; 0,5
			BT	0,25; 0,5

ИНФОРМАТИВНЫЙ ПРИЗНАК ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ВИДОВ МОДУЛЯЦИИ РАДИОСИГНАЛОВ С НЕПРЕРЫВНЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ ФАЗЫ НА ОСНОВЕ КЛАССИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ФАЗОВЫХ ДИАГРАММ

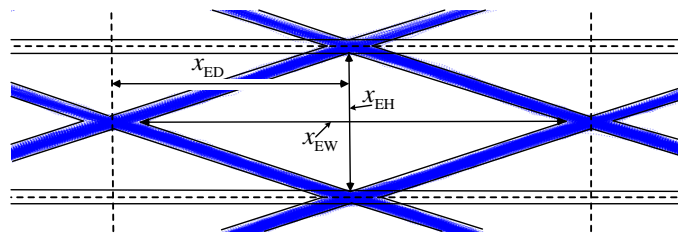
Проведенный анализ информативности параметров ФД, в рамках решаемой задачи, выявил следующие признаки, позволяющие провести классификацию параметров ФД разных видов модуляции с требуемой достоверностью (рис. 3):

$$f_{\text{оц}}^{\text{инф}}(\xi_{ph}) = \{x_{EW}, x_{ED}, x_{EH}\}, \quad (6)$$

где x_{EW} — ширина «чистого глаза»;

x_{EH} — амплитуда «чистого глаза»;

x_{ED} — «глазковая задержка».

Рис. 3. Параметры x_{EW}, x_{ED}, x_{EH} ФД по модулю $2 \cdot \pi$

Графическое отображение полученных значений параметров x_{EW}, x_{ED}, x_{EH} в двумерном пространстве признаков для $\Omega_{\text{МНФ}}$ представлено на рис. 4.

Основным показателем качества работы системы распознавания, который широко используется в статистической теории распознавания образов, является вероятность распознавания, которая в нашем случае будет зависеть от совпадения параметров ФД. Анализируя рис. 4, сделаем вывод о том, что при одновременном рассмотрении трех параметров ФД x_{EW}, x_{ED}, x_{EH} существует возможность их разделения по принадлежности к областям локализации значений признаков различных классов в многомерном пространстве параметров.

Путем математического моделирования была проведена серия статистических испытаний, которые позволили получить выражения для законов распределения признаков и основных числовых характеристик распределения параметров ФД x_{EW}, x_{ED}, x_{EH} .

Так как задача классификации решается на основе анализа принятого на фоне шумов сигнала, несущего неизвестное информационное сообщение, то все перечисленные в априорном словаре признаки являются стохастическими, а их значения – случайными величинами (СВ).

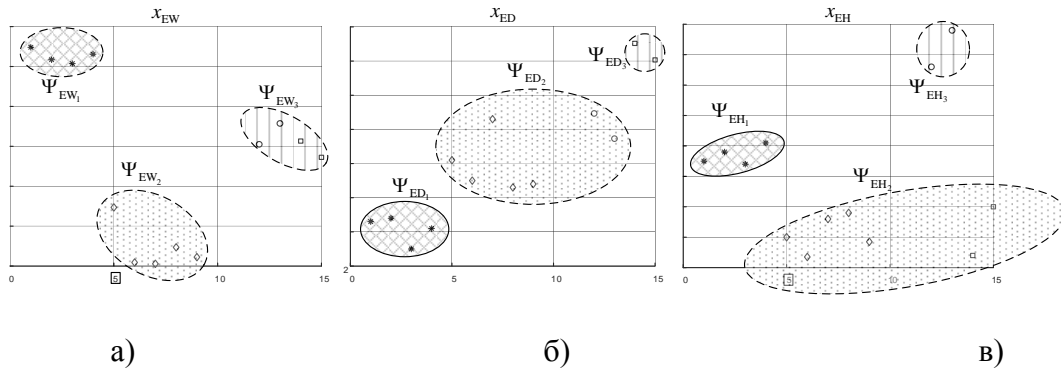


Рис. 4. Представление параметров ФД, соответствующих определенным классам (видам модуляции) $\Psi_{p(i)}$ априорного словаря:

а – ширина «чистого глаза»; б – «глазковая задержка»;
в – амплитуда «чистого глаза»

Для оценивания законов распределений параметров СВ $\tilde{x}_{EW}, \tilde{x}_{ED}, \tilde{x}_{EH}$ выдвинута первоначальная гипотеза о возможности их аппроксимации нормальным законом распределения [8]. Для определения закона распределения использован метод Смирнова с целью проверки гипотез о законе распределения. На рис. 5 представлены гистограммы и статистические функции распределения параметров ФД, а также их аппроксимация теоретическим законом распределения.

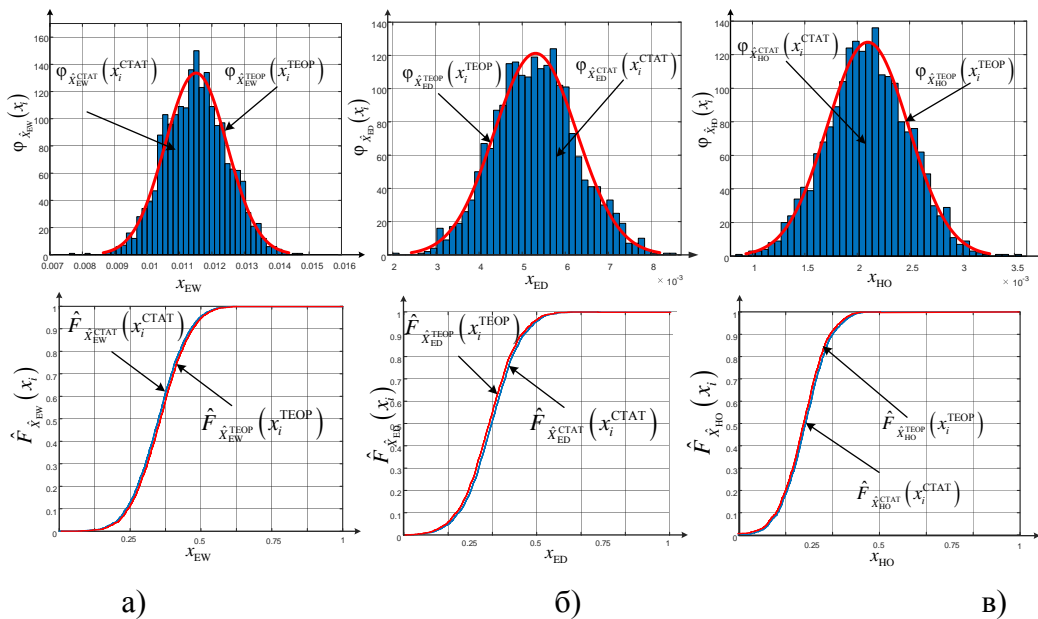


Рис. 5. Плотности вероятности и функции распределения параметров ФД $\tilde{x}_{EW}, \tilde{x}_{ED}, \tilde{x}_{EH}$:
а – ширина «чистого глаза»; б – «глазковая задержка»;
в – амплитуда «чистого глаза»

В результате имитационного моделирования и проверки гипотез о законах распределения оцениваемых параметров установлено, что параметры \tilde{x}_{EW} , \tilde{x}_{ED} , \tilde{x}_{EH} представляют собой случайные величины, распределенные по нормальному закону распределения. В этом случае для описания статистических характеристик оценок параметров ФД достаточно математического ожидания $M(x)$ и среднеквадратичного отклонения $\sigma(x)$.

Для обоснования необходимой длины выборки производилось оценивание флуктуации параметров x_{EW} , x_{ED} , x_{EH} в зависимости от длины анализируемой последовательности модуляционных символов (рис. 6).

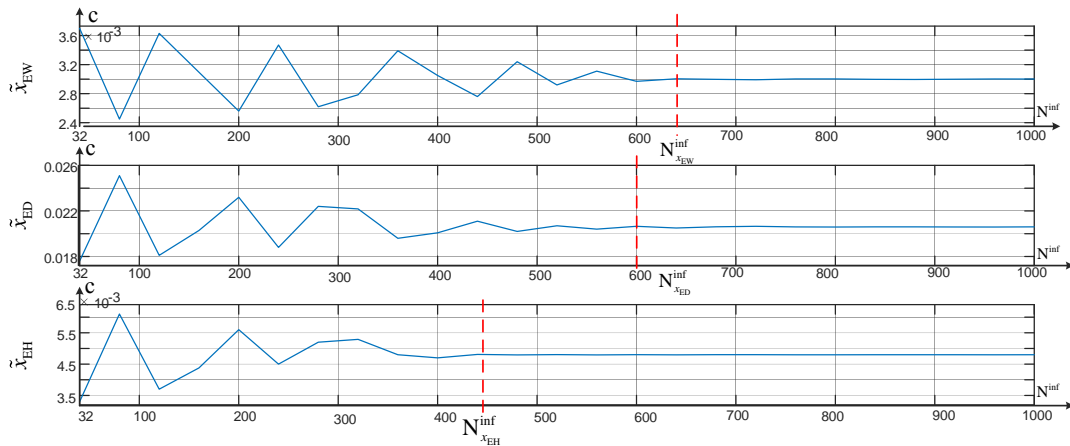


Рис. 6. Оценивание флуктуации параметров ФД \tilde{x}_{EW} , \tilde{x}_{ED} , \tilde{x}_{EH}

В ходе проведения численных экспериментов для каждой из описанных модификаций видов манипуляций подтверждено, что требуемая точность оценок параметров \tilde{x}_{EW} , \tilde{x}_{ED} , \tilde{x}_{EH} достигается при длине последовательности модуляционных символов, превышающей 640 символов в условиях $N^{\text{inf}} = \max(N_{x_{EW}}^{\text{inf}}, N_{x_{ED}}^{\text{inf}}, N_{x_{EH}}^{\text{inf}})$.

На рис. 7 представлены результаты моделирования при условии, что длина информационной последовательности составляет 900 символов и отношение сигнал/шум равно 12 дБ.

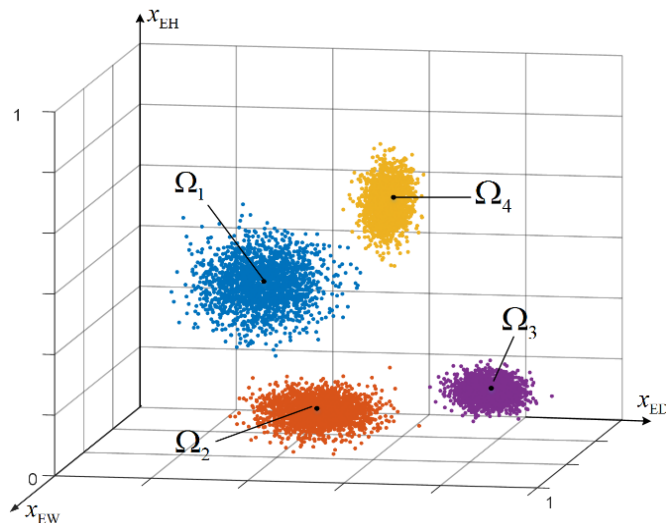


Рис. 7. Результаты оценивания в трехмерном пространстве параметров ФД

Известно, что из-за неидеальности радиопередающего и радиоприемного трактов, а также вследствие влияния помех в канале связи измерение (оценивание) параметров ФД СМНФ всегда осуществляется неточно:

$$\tilde{X}_{\text{фд}} = X_{\text{фд}} + \hat{\delta}_{X_{\text{фд}}}, \quad (7)$$

где $\tilde{X}_{\text{фд}}$ – оценка параметра ФД, $\tilde{X}_{\text{гд}} \in \{\tilde{x}_{EW}, \tilde{x}_{ED}, \tilde{x}_{EH}\}$;
 $\hat{\delta}_{X_{\text{фд}}}$ – значение ошибки измерения параметров ФД;
 $X_{\text{фд}}$ – истинное значение параметров ФД.

Значения оценок параметров ГД зависят от отношения сигнал/шум $q_{\text{осш}} = E/N$, где E – средняя мощность сигнала, N – средняя мощность шума. Чем это отношение больше, тем меньше разброс оценок значений относительно истинного ($\lim_{E/N \rightarrow \infty} \delta = 0$).

На рис. 8 показаны графики зависимостей среднеквадратичного отклонения ошибки оценивания параметров ФД $\tilde{x}_{EW}, \tilde{x}_{ED}, \tilde{x}_{HO}$ от отношения сигнал/шум.

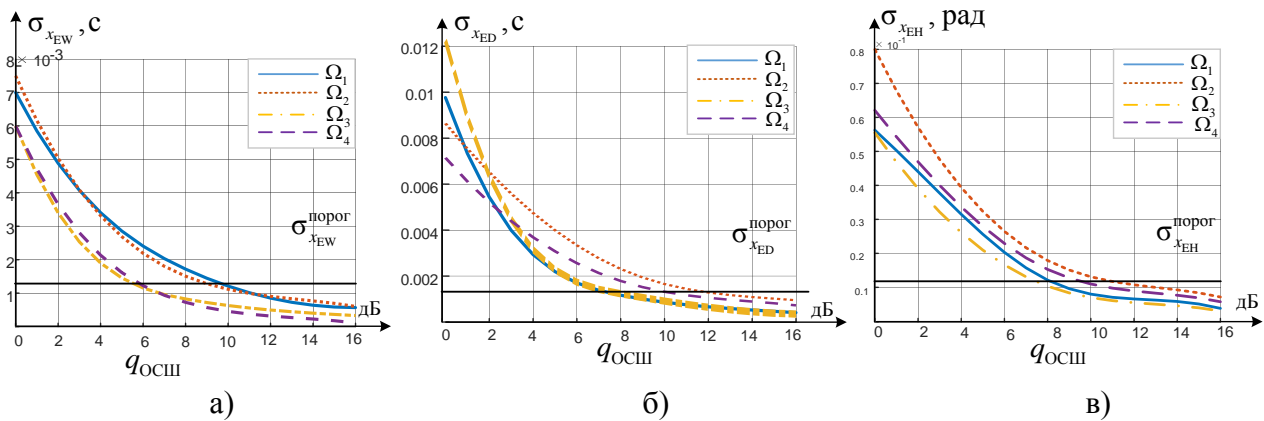


Рис. 8. График зависимости SKO от отношения сигнал/шум при оценивании параметров ФД:
 а – ширины «чистого глаза»; б – «глазковой» задержки;
 в – амплитуды «чистого глаза»

Полученные результаты свидетельствуют о том, что предложенный перечень параметров ФД может быть использован для обеспечения распознавания вида модуляции в классе СМНФ с высокой достоверностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная модель позволяет исследовать возможности по распознаванию видов модуляции радиосигналов с непрерывным изменением фазы, применяемых в современных системах передачи информации. На основе разработанной описательной модели исследованы основные свойства СМНФ:

- требуемая точность оценок параметров $\tilde{x}_{EW}, \tilde{x}_{ED}, \tilde{x}_{EH}$ достигается при длине последовательности модуляционных символов, превышающей 640 символов;
- статистические распределения параметров ФД можно адекватно аппроксимировать нормальным законом распределения;

– параметры x_{EW}, x_{ED}, x_{EH} фазовых диаграмм обеспечивают наилучшие результаты кластеризации классов множества $\Omega_{\text{МНФ}}$.

Список используемых источников

1. Деев В.В. Методы модуляции и кодирования в современных системах связи. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2003. – 137 с.
2. Обнаружение и анализ сигналов сложной структуры / под ред. А.И. Замарина. – СПб.: МО РФ, 1996. – 552 с.
3. Гизунов С.А., Гречкин А.О., Коновальчик П.М. Анализ сигналов электросвязи. – М.: Янус-К, 2005. – 346 с.
4. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение: пер. с англ. – М.: Вильямс, 2003. – 1104 с.
5. Смирнов А.В. Оценка параметров глазковой диаграммы по переходной и амплитудно-частотной характеристикам с использованием нейронной сети // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2018. – № 3. – С. 73–87.
6. Ткалич О.П., Дятлов А.А., Мамаев Р.А. Применение глазковых диаграмм для исследования цифровых сигналов // Электроника для систем управления. – 2009. – № 20. – С. 32–41.
7. Кириллов С.Н., Покровский П.С. Алгоритм классификации вида модуляции неизвестного радиосигнала космических систем передачи информации // Вестник РГРТУ. – 2013. – № 44. – С. 3–11.
8. Статистические методы обработки результатов измерений / Р.М. Юсупов, Г.Б. Петухов, В.Н. Сидоров и др.; под ред. Р.М. Юсупова. – МО РФ, 1984. – 563 с.

А.П. Алёшкин,
доктор техн. наук, профессор;
К.К. Зубарев;
А.А. Макаров,
доктор техн. наук, доцент

ПРИМЕНЕНИЕ МОБИЛЬНОЙ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРИИ В ЗАДАЧЕ КООРДИНАТНО-ВРЕМЕННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ УДАЛЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Выполнен сравнительный анализ методов определения координат стационарного приемного пункта системы единого времени по результатам измерений навигационного приемника сигналов глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС и по наблюдениям излучения квазаров в малогабаритных радиоинтерферометрических комплексах с длинной базой (МРСДБ). Применение МРСДБ предоставляет возможность повысить надежность координатно-временного и навигационного обеспечения (КВНО) наземных потребителей. Предлагается подход, ориентированный на использование средств длиннобазовой радиоинтерферометрии в целях прецизионного позиционирования удаленного радиотелескопа. Предложение может быть полезным для решения специальных задач координатно-временного и навигационного обеспечения, в частности для прецизионного местоопределения и временной коррекции шкал удаленного приемного пункта системы единого времени.

Ключевые слова: ГЛОНАСС, GPS, радиоинтерферометрия со сверхдлинной базой (РСДБ), позиционирование, синхронизация.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие технологии высокоточного сличения территориально удаленных стандартов частоты и времени (СЧВ) имеет важное научное и прикладное значение. Уровень предъявляемых при этом требований по точности характеризуется значениями от единиц до долей наносекунд для сдвига шкал времени (ШВ) и от 10^{-14} до 10^{-16} Гц – для разности частот.

В настоящее время основным средством позиционирования стационарного приемного пункта системы единого времени (СПП СЕВ) являются усредненные данные навигационных определений используемого штатного приемника сигналов ГЛОНАСС. Решающая величина погрешности определения фазового центра антенны объекта позиционирования в глобальных навигационных спутниковых системах (ГНСС) в основном обусловлена внесением дополнительного запаздывания при распространении сигналов радионавигационных спутников на пути борт – земля [1–3]. Это становится определяющим вкладом в бюджет погрешностей, особенно в условиях ограниченности времени наблюдения. Повышение точности позиционирования фазового центра приемной антенны СПП СЕВ позволит устранить погрешность сличения шкал времени, вызываемую неточностью определения местоположения пункта.

ПРИМЕНЕНИЕ МОБИЛЬНОЙ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

В настоящее время практически во всех СПП СЕВ координаты пункта приема формируются в модуле навигационной аппаратуры потребителя ГНСС ГЛОНАСС/ GPS – К-161 [4, 5]. При этом фиксируется положение фазового центра антенны приемника относительно известных положений космических аппаратов ГНСС. Поправка часов ГНСС содержится в навигационном сообщении в виде полиномиальной модели. Задержки сигнала в аппаратуре спутника и в приемнике выявляются путем калибровок. По результатам навигационных измерений решается классическая система уравнений [6, 7].

Системы синхронизации принципиально отличаются от других систем алгоритмами измерений, основанными либо на учете, либо на исключении времени задержки сигналов синхронизации в среде распространения. Методы передачи частотно-временной информации (ЧВИ) условно делят на три группы [8].

Метод односторонней передачи сигналов ЧВИ основан непосредственно на передаче сигналов ЧВИ ведущей или опорной ШВ. Это позволяет потребителям осуществлять прием и непосредственную синхронизацию по сигналам ведущей ШВ. Важным является возможность реализации взаимного сличения на основе одновременного использования опорного сигнала двух и более территориально удаленных ШВ – дифференциального сличения.

Метод дифференциальных сличений (common view) [9] заключается в организации сличения пары удаленных ШВ с третьими (опорными) часами.

При реализации дифференциальных сличений к характеристикам третьих часов, обеспечивающих передачу сигналов времени, не предъявляется существенных требований. Однако наиболее критическим элементом здесь является синхронность приемов излучаемых сигналов. Степень исключения влияния третьих часов определяется, с одной стороны, синхронностью приемов каждым из партнеров, а с другой – точностью учета эффектов распространения сигнала от третьих часов до каждого из приемных пунктов сличаемых ШВ.

Наибольшее применение метод дифференциальных сличений удаленных ШВ получил на основе использования сигналов космических навигационных систем с глобальным покрытием GPS и ГЛОНАСС.

В настоящее время существующая аппаратура привязки позволяет проводить измерение расхождений ШВ территориально разнесенных на расстояние до 100 км объектов со среднеквадратической погрешностью 5 нс при времени измерения 1 сут. и 10 нс – для объектов, разнесенных на расстояния до 6000 км.

Основными источниками погрешностей являются:

- геометрическая дальность (эфемериды, координаты фазовых центров антенн);
- ионосфера;
- тропосфера;
- многолучевость;
- вариации внутренних задержек в системе приемная антенна – антенные фидеры – собственно приемник.

Одним из серьезных ограничений, особенно на больших расстояниях (более 2000 км), является влияние ионосферы. До некоторой степени оно может быть подавлено использованием двухчастотной линейной комбинации измерений на частотах L1 и L2. Фактически пределом подавления влияния ионосферы являются ограничения самого источника сигнала, систематическая разность групповых задержек для L1 и L2 составляет не более 15 нс при ее вариации 3 нс.

Следующим по массовости является *метод наблюдения и усреднения по всем видимым спутникам* – all in view (AV). Этот метод, в отличие от предыдущего, предусматривает получение вторых разностей не по конкретным совместно видимым спутникам, а по системе в целом. Преимуществом этого метода является возможность работы в каждом пункте со всеми видимыми спутниками. Это особенно актуально для работы между удаленными лабораториями, которые в режиме CV вынуждены принимать сигналы весьма ограниченного числа совместно видимых, возможно, довольно низких спутников на ограниченных азимутах. Тем не менее предельные точностные характеристики этого метода сличений с использованием кодовых сигналов ограничены нестабильностью приемного тракта, многолучевостью и трудностями учета задержки распространения сигнала, несмотря на наличие двухчастотного режима работы, и использованием апостериорных эфемерид.

Наиболее потенциально точной реализацией метода дифференциальных сличений является технология, основанная на обработке фазы несущей частоты сигнала навигационной системы – carrier phase (CP). Эта технология требует приемной аппаратуры геодезического

класса и апостериорной обработки результатов измерения. Использование геодезической приемной аппаратуры в режиме обработки несущей фазы (CP) позволяет достичь высокой разрешающей способности, в первую очередь по частоте. При этом предельные точностные характеристики канала сличений также определяются фазовой нестабильностью приемного тракта и возможной многолучевостью. Высокая точность технологии, основанной на обработке фазы несущей частоты сигнала навигационной системы CP, и теоретическая оценка разрешающей способности по времени, составляющая десятки пикосекунд, подтверждаются к настоящему времени практическими реализациями. Однако сложность антенно-фидерного и радиотехнического трактов аппаратуры, трудность реализации высокоточной калибровки существенно усложняют возможности достижения потенциальных точностей сличений на практике и требуют дополнительных фундаментальных исследований точностных характеристик.

Важным общим недостатком дифференциальных сличений на основе использования ГНСС ГЛОНАСС/GPS является существенное снижение потенциальных возможностей при увеличении пространственной удаленности сличаемых ШВ. Уже при дальностях сличаемых ШВ более 500 км проявляется различие моделей распространения навигационного сигнала, что приводит к погрешности расчета времени распространения и требует дополнительных фундаментальных исследований реализации точностных характеристик. Неадекватность модели распространения навигационного радиосигнала из-за влияния тропосферы и ионосферы в используемых диапазонах длин волн КНС является основным ограничивающим фактором точности сличения ШВ. Таким образом, на основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что использование метода высокоточных дифференциальных сличений, даже в его современной, наиболее точной реализации с применением двухчастотных приемников КНС и обработкой фазы несущей частоты сигнала навигационной системы, не позволит обеспечить взаимную синхронизацию удаленных на большие расстояния ШВ со среднеквадратической погрешностью менее 1 нс и систематической погрешностью менее 3 нс. [5]

Рассмотрим совершенствование алгоритмов метода дифференциальных сличений путем применения длиннобазовых систем внешнего излучения – РСДБ.

Последнее время все больший интерес вызывают малогабаритные антенны. Это обусловлено тем, что радиотелескопы с антеннами больших размеров значительно уступают им по скорости обзора пространства, но выигрывают при наблюдении слабых источников. Несмотря на это способности наблюдать только яркие квазары хватает для решения координатных задач.

Уменьшение диаметра антенны снижает чувствительность радиотелескопа, что должно быть компенсировано определенными техническими решениями в приемной аппаратуре. Такими решениями могут являться увеличение полосы пропускания и снижение шумовой температуры фидерных трактов (охлаждение облучателя и входов трактов, использование трехдиапазонной приемной системы), внедрение усовершенствованных алгоритмов обработки наблюдений [8].

На сегодняшний день успешные разработки малогабаритных РСДБ систем выполняются за рубежом. Так, в 2009 году в Японии был реализован проект малогабаритного радиоинтерферометрического комплекса с длинной базой диаметром около 1,5 м (рис. 1) [8, 10, 11].



Рис. 1. Приемная антенна малогабаритного радиоинтерферометрического комплекса с длинной базой диаметром около 1,5 м

В Российской Федерации также активно проводятся исследования по данному направлению. Так, в Нижегородском госуниверситете имени Н.И. Лобачевского имеются две полноповоротные параболические антенны азимутально-угломестной монтировки с диаметрами зеркал 2 и 2,5 метра (РТ-2 и РТ-2.5) [11], а в Институте прикладной астрономии РАН исследуются малогабаритные радиоинтерферометрические комплексы с длинной базой компактные МРСДБ, антенны диаметром 1,5 м и 2,4 м (рис. 2) [12].

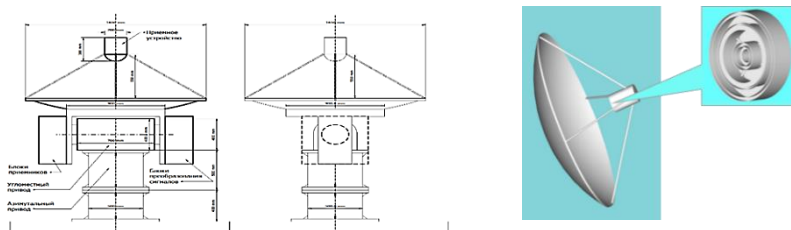


Рис. 2. Пример малогабаритной антенны радиотелескопа диаметром 1,5 м

Геометрический фактор оказывает существенное влияние на определение фазового центра радиотелескопа и интенсивность входных шумов, и при переходе от антенн с большим диаметром к малым антеннам их значения растут. Поэтому решение задачи КВО требует разработки новых оригинальных методик.

Рассмотрим подход к определению положения фазового центра антенны малогабаритного РТ в произвольной точке земной поверхности по наблюдениям излучения квазаров в радиоинтерферометрических комплексах с длинной базой путем решения обратной навигационной задачи [1–3, 13–15].

Привлекательность подхода заключается в использовании естественных радиоисточников, что повышает устойчивость процесса навигационных определений, так как не зависит от стабильности сигналов ИСЗ. Кроме того, зеркальные антенны РТ характеризуются высокой направленностью, и к моменту выполнения мероприятий КВО не предъявляется особых требований.

Если ориентироваться на использование мобильного варианта радиотелескопа (МРТ), то серьезный научный и прикладной интерес вызовет вопрос о достижимых точностях его местоопределения в сравнении со стационарным вариантом, для которого отмеченная погрешность характеризуется миллиметровыми значениями.

Опишем алгоритм уточнения координат фазового центра антенны малогабаритного варианта РСДБ на основе определения задержки прихода сигнала от одного и более квазаров до стационарного телескопа, координаты которого известны с потенциально достижимой точностью, и мобильного, координаты которого уточняются (рис. 3).

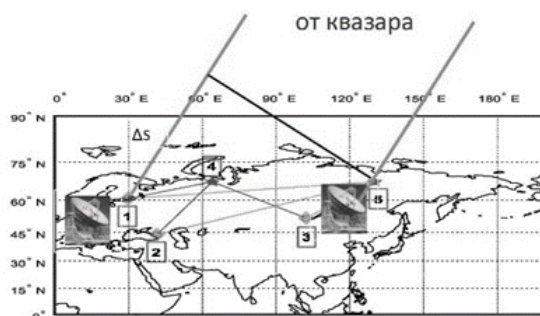


Рис. 3. Пример расположения МРТ

На рис. 3 позиции 1–3 соответствуют РТ – станции существующего комплекса «Квазар» [16], а позиции 4 и 5 – исследованным в процессе моделирования вариантам МРТ.

Проводя одновременные измерения по квазарам, можно решить задачу уточнения текущих координат МРТ, благодаря чему становится возможной реализация процедуры сличения ШВ стандарта частотно-временного обеспечения МРТ со шкалой стандарта опорного РТ. Действительно, если позиция МРТ определена с необходимой погрешностью, то основной вклад в несоответствие значения измеренного времени запаздывания прихода излучения от квазара на пункт 1 относительно пункта 2 расчетному значению вносит рассогласование их ШВ.

Пусть i -е наблюдение источника излучения с координатами на небесной сфере α_i , δ_i выполняется в момент звездного времени t_i , где α_i – угол склонения, а δ_i – угол восхождения источника.

Излучение от квазара достигает фазового центра антенны радиотелескопа 1(2,3) относительно фазового центра антенны радиотелескопа 4(5) с задержкой τ , обусловленной разностью хода $\Delta S = c\tau$, где c – скорость распространения радиоволн. Задержка τ измеряется корреляционным методом, а принимаемые сигналы на телескопах 4(5) и 1(2,3) сводятся в корреляторе.

Представим математическую модель навигационной функции измерений.

Задержка τ_i распространения излучения от i -го квазара до радиотелескопов (для простоты) 1 и 2 может быть представлена соотношением

$$\tau_i = \frac{1}{c} \left(\cos \delta_i \left((x_1 - x_2) \cos(\alpha_i - \omega t_i) + (y_1 - y_2) \sin(\alpha_i - \omega t_i) \right) + (z_1 - z_2) \sin \delta_i \right), \quad (1)$$

где ω – угловая скорость вращения Земли;

x_1, y_1, z_1 – координаты фазового центра антенны радиотелескопа 1(2,3);

x_2, y_2, z_2 – координаты фазового центра антенны радиотелескопа 4(5).

Основой методики определения координат мобильной станции по РСДБ наблюдениям является формирование уравнения наблюдения вида

$$\nabla \vec{\tau}_{nx1} = A_{nx3} * \nabla \vec{q}_{3x1}, \quad (2)$$

Здесь n – количество точек измерений, соответствующих моментам наблюдения $t = 1, 2, \dots, i, \dots, n$.

Точность решения навигационной задачи характеризуется корреляционной матрицей погрешностей оценивания $K_q = \sigma^2 (A^T A)^{-1}$, где σ^2 – дисперсия шума измерений.

Моделирование процесса местоопределения МРТ (рис. 4) выполнено с использованием процедуры минимизации суммы квадратов невязок $\nabla \vec{\tau} = \vec{\tau}_{изм} - \vec{\tau}_{лх1см}$.

Достоинствами разрабатываемого алгоритма являются простота и малое время расчетов. Требуется всего несколько итераций для нахождения координат фазового центра антенны РТ.

Проанализируем результаты сравнения методов позиционирования стационарного ПП СЕВ с помощью технологий ГНСС и мобильных РСДБ наблюдений.



Рис. 4. Схема алгоритма имитационного моделирования местоопределения МРТ

Для сравнения были использованы следующие данные:

1. Результаты реального позиционирования, выполненного с помощью навигационного приемника сигналов ГНСС ГЛОНАСС К-161 в абсолютном режиме [17].

2. Результаты имитационного компьютерного моделирования процесса позиционирования МРТ по данным наблюдений излучения квазаров в радиоинтерферометрических комплексах с длинной базой.

В табл. 1 представлены результаты позиционирования стационарного приемного пункта системы единого времени (координаты при $t_n = 1$ с, $t_n = 86400$ с составляют $X = 2764545,69$; $Y = 1614601,91$; $Z = 5497986,72$), ΔR определяется по следующей формуле:

$$\Delta R = \sqrt{(x_{см} - x_{ист})^2 + (y_{см} - y_{ист})^2 + (z_{см} - z_{ист})^2}.$$

Таблица 1

**Результаты позиционирования стационарного приемного пункта
системы единого времени**

Наименование ГНСС	Количество	Время измерения, с	Измеряемые координаты, м			СКП	ΔR
			Наименование параметра	Текущие	Средние		
ГЛОНАСС	8	120	X	2764538,41	2764538,84	6,85	7,79
			Y	1614604,31	1614604,91	3,00	
			Z	5497985,81	5497988,92	2,20	
		360	X	2764537,44	2764537,98	7,71	8,38
			Y	1614601,06	1614603,55	1,64	
			Z	5497976,03	5497983,87	2,85	
ГЛОНАСС +GPS	7+9	120	X	2764539,13	2764538,84	6,85	11,25
			Y	1614599,00	1614598,31	3,60	
			Z	5497980,47	5497978,56	8,16	
		360	X	2764541,97	2764540,09	5,60	5,59
			Y	1614599,94	1614598,95	2,96	
			Z	5497981,91	5497980,92	5,80	
МРТ	2	120	X	2764539,13	2764543,21	4,08	4,16
			Y	1614599,00	1614600,57	1,57	
			Z	5497980,47	5497981,05	0,58	
		360	X	2764541,97	2764543,13	1,16	1,17
			Y	1614599,94	1614600,00	0,06	
			Z	5497981,91	5497982,06	0,15	

На рис. 5 представлена зависимость ошибки местоопределения МРТ для двух квазаров и интервала наблюдения $t_n = 120$ с при воздействии шума измерений с среднеквадратичным отклонением (СКО) $\sigma = 10^{-6}$ с. Для указанных исходных данных процесс оценивания по методу наименьших квадратов расходится (погрешность местоопределения ΔR составляет более 200 м). Это связано со значительным влиянием геометрического фактора.

Построение целевой функции (рис. 6) подтверждает отсутствие глобального экстремума при поиске решения навигационной задачи для выбранных исходных данных.

На рис. 7 представлена зависимость погрешности местоопределения центра фаз МРТ от номера итерации для четырех квазаров при интервале их наблюдения по $t_n = 120$ с и воздей-

ствии шума с СКО $\sigma = 10^{-9}$ с. Для этих исходных данных итерационный процесс завершается на пятой итерации, и ее погрешность составляет менее 0,3 м

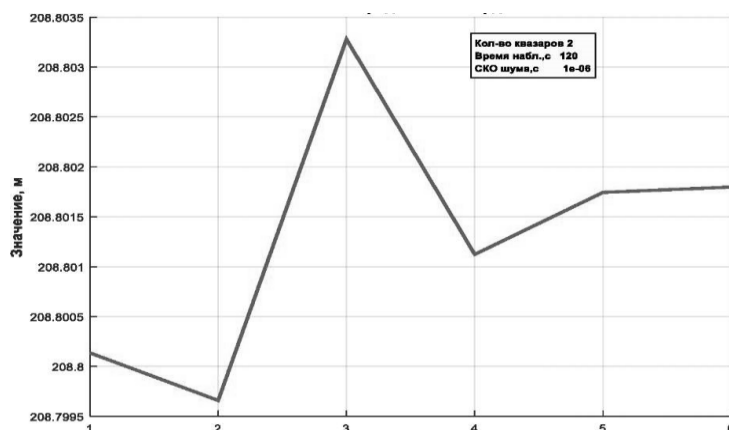


Рис. 5. Итерационный процесс местоопределения МРТ для двух квазаров:
 $t_n = 120$ с; $\sigma = 10^{-6}$ с

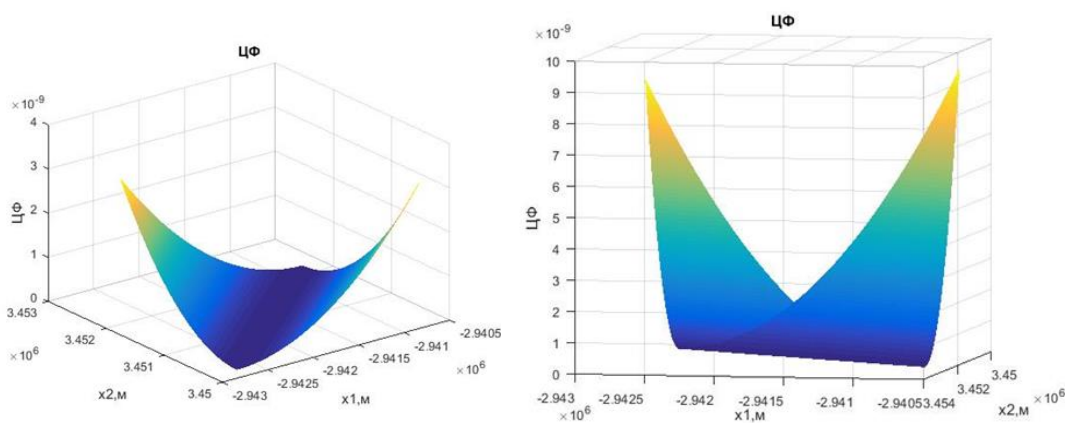


Рис. 6. Целевая функция, формируемая в процессе местоопределения МРТ для двух квазаров:
 $t_n = 120$ с; $\sigma = 10^{-6}$ с

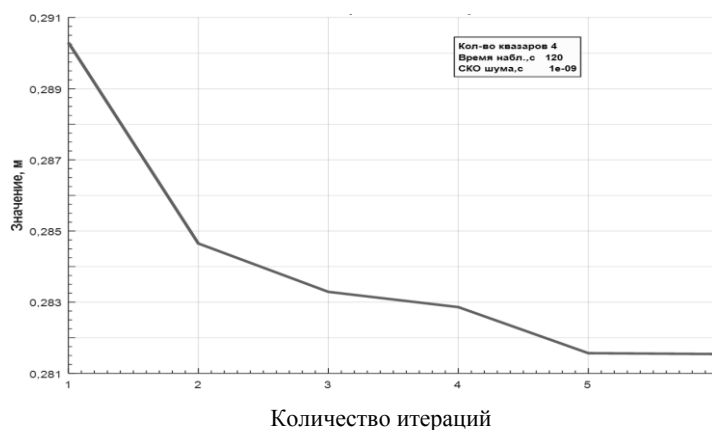


Рис. 7. Итерационный процесс местоопределения МРТ для четырех квазаров:
 $t_n = 120$ с; $\sigma = 10^{-9}$ с

На рис. 8 и 9 соответственно представлены зависимость ошибки местоопределения центра фаз антенны МРТ и целевая функция, формируемая в процессе местоопределения для четы-

рех квазаров при увеличении интервала наблюдения до $t_n = 360$ с и СКО шума $\sigma = 10^{-9}$ с. Для этих исходных данных решение по методу наименьших квадратов формируется уже на второй итерации, и ее погрешность достигает единицы сантиметров.

Результаты моделирования показывают, что высокие точности местоопределения МРТ достижимы для незначительной продолжительности времени наблюдения квазаров и малой интенсивности шума наблюдений.

При увеличении дисперсии шумов и изменении геометрического фактора в худшую сторону итерационный процесс поиска решения задачи местоопределения может расходиться. Для такого случая была разработана методика определения координат МРТ, основанная на процедурах эмпирического поиска решения. При этом для нахождения вектора \vec{q} , обеспечивающего минимум целевой функции, выбран симплексный метод прямого поиска Нелдера – Мида.

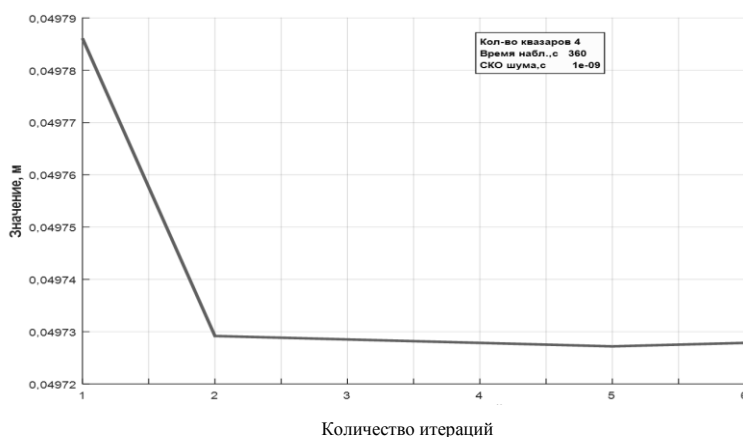


Рис. 8. Итерационный процесс местоопределения МРТ для четырех квазаров:
 $t_n = 360$ с; $\sigma = 10^{-9}$ с

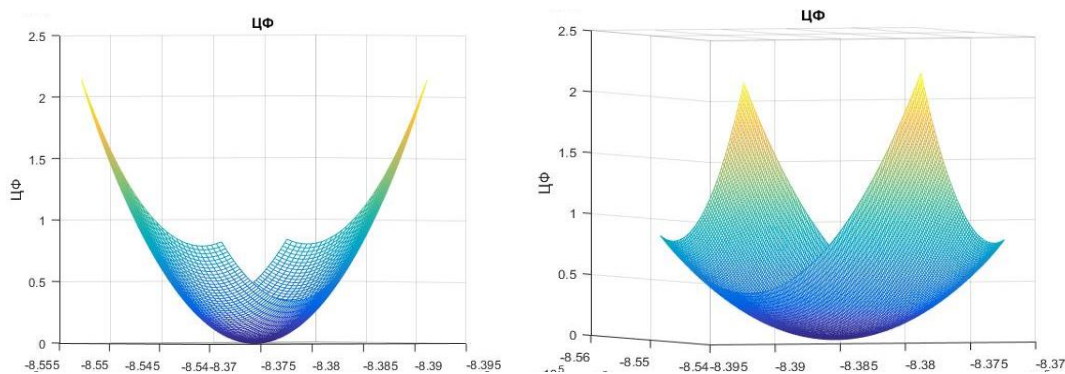


Рис. 9. Целевая функция, формируемая в процессе местоопределения МРТ для четырех квазаров:
 $t_n = 360$ с; $\sigma = 10^{-9}$ с

На рис. 10 представлена погрешность местоопределения МРТ при приеме излучения двух квазаров при времени наблюдения по $t_n = 120$ с и СКО шума $\sigma = 10^{-9}$ с использованием процедуры прямого эмпирического поиска решения.

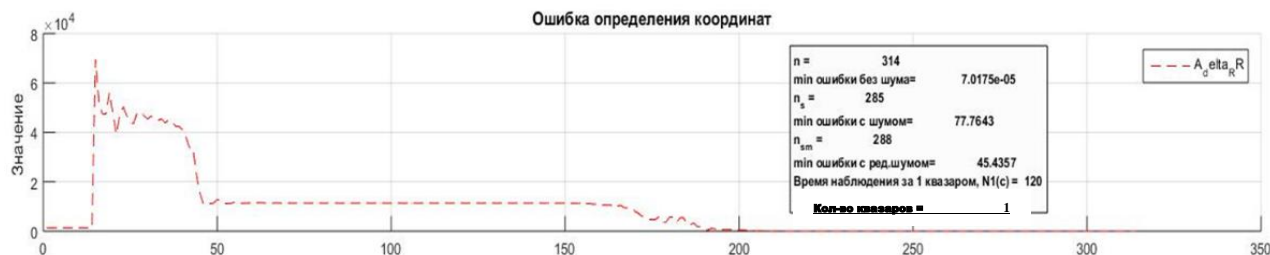


Рис. 10. Эмпирический поиск решения для двух квазаров:
 $\sigma = 10^{-9}$ с; $t_n = 120$ с

В результате проведения научных исследований авторами разработан программно-моделирующий комплекс (ПМК). Этот комплекс способен реализовать методики определения координат фазового центра антенны перебазируемого РСДБ комплекса по наблюдениям излучения квазаров путем прямого эмпирического поиска и классическим методом решения обратной задачи.

ПМК позволяет формировать целевую функцию и получать сравнительную оценку решений задачи КВО удаленных потребителей при различном составе исходных данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен сравнительный анализ методов КВО удаленных потребителей по данным измерений штатного навигационного приемника сигналов ГНСС ГЛОНАСС и по наблюдениям излучения квазаров с помощью малогабаритных телескопов в радиоинтерферометрических комплексах с длинной базой.

Результаты моделирования показывают, что использование предлагаемого метода КВО с помощью мобильной радиоинтерферометрии позволяет получить лучшее по точности решение при приеме МРТ излучений квазаров даже на небольших интервалах наблюдения, но в условиях слабой интенсивности шума измерений. Переход к процедурам прямого эмпирического поиска решения целесообразен, когда итерационный процесс поиска решения расходится, что возможно при увеличении шума наблюдений.

Преимущества метода определения координат по мобильным РСДБ наблюдениям состоят в более высокой устойчивости процессов координатно-временных определений потребителей в сравнении с ГНСС – обеспечением.

Показано, что для среднестатистических условий РСДБ наблюдений погрешность позиционирования МРТ составляет единицы дециметров, что в пересчете на неточность сличения ШВ для удаленного потребителя дает единицы наносекунд.

Список используемых источников

1. Шебшаевич В.С., Дмитриев П.П., Иванцевич Н.В. Сетевые спутниковые радионавигационные системы / под ред. В.С. Шебшаевича. – М.: Радио и связь, 1993. – 408 с.
2. Дулевич В.Е. Теоретические основы радиолокации: учеб. пособие для вузов / под ред. В.Е. Дулевича. – 2-е изд. – М.: Сов. радио, 1978. – 608 с.
3. Основы радионавигационных измерений / В.А. Губин, Н.Ф. Ключев, А.А. Костылев и др. – МО СССР, 1987. – 430 с.
4. Модули первого поколения ГНСС ГЛОНАСС/ GPS — 1К-161, К-161. – URL: <http://rirt.ru/ru/products> (дата обращения: 17.01.2018).
5. Навигационный приемник 1К-161-42 спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS – URL: <http://www.glonass-portal.ru/catalog/modules/1k161> (дата обращения: 17.01.2018).

6. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. – М.: ФГУП «Картоцентр», 2005. – Т. 1. – 334 с.
7. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. – М.: ФГУП «Картоцентр», 2005. – Т. 2. – 360 с.
8. Трехдиапазонная приемная система для радиотелескопов с малыми антеннами / Д.В. Иванов, В.В. Мардышкин, А.С. Лавров, А.А. Евстигнеев // Труды ИПА РАН. – 2013. – Вып. 27. – С. 197–201.
9. Оценка возможности использования малогабаритных РСДБ систем для решения задач КВНО / Д.В. Иванов, А.В. Ипатов, И.С. Гаязов и др.: доклад // КВНО-2017. 17–21 апреля 2017, г. Санкт-Петербург. – 18 с.
10. Алёшкин А.П., Макаров А.А., Иванов Д.В. Некоторые результаты исследования возможности применения малогабаритных мобильных радиointерферометров со сверхдлинными базами для сличения шкал времени удаленных объектов // Метрологический вестник. – 2017. – Т. 9, № 5. – С.19–31.
11. Труды Института прикладной астрономии РАН. – СПб.: ИПА РАН, 2016. – Вып.37. – С.19–22.
12. Радиointерферометр с независимым приемом / Н.А. Дугин, В.Г. Гавриленко, А.А. Антипенко и др. / ННГУ – НИРФИ – Ирбене // Вестник Нижегородского университета имени Н.И. Лобачевского. – 2013. – № 1 (1). – С. 79–85.
13. Айвазян С.А. Прикладная статистика. Основы эконометрики. – М.: Юнити-Дана, 2001. – Т. 2. – 432 с.
14. Применение подвижных радиointерферометров с длинной базой для повышения устойчивости навигационно-временных определений / А.П. Алешкин, А.А. Макаров, Д.В. Иванов, А.В. Ипатов // Известия вузов. Приборостроение. – 2017. – Т. 60, № 6. – С. 529–537.
15. Параметры Земли 1990 года (ПЗ-90.11): справочный документ. – М.: ВТУ ГШ ВС РФ, 2014. – 52 с.
16. Наземный стационарный приемный пункт 3 класса точности 146763: метод. пособие / А.А. Макаров, Т.О. Мысливцев, В.В. Зыбин и др. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2013. – 91 с.
17. National Institute of Information and Communications Technology. – URL: <http://www.nict.go.jp/en/index.html> (дата обращения: 01.05.2017).

А.П. Алёшкин,
доктор техн. наук, профессор;
В.В. Владимиров;
П.В. Савочкин,
кандидат техн. наук, доцент

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАГОРИЗОНТНОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ НА РЕЗУЛЬТАТИВНОСТЬ ОБНАРУЖЕНИЯ НАЗЕМНОЙ ЦЕЛИ НА ФОНЕ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Представлена методика расчета отношения сигнал/помеха в радиолокационном канале наблюдения лоцируемых объектов на фоне подстилающей поверхности. Рассмотрен в первом приближении численный пример вычисления отношения сигнал/помеха на выходе для конкретного случая загоризонтной радиолокационной станции. Проведен анализ зависимости характеристики отношение сигнал/помеха от релевантных входных параметров. На основании анализа полученных результатов сделан вывод о возможности достижения требуемых значений отношения сигнал/помеха путем сужения ширины диаграммы направленности антенны, определяющей площадь зоны обзора загоризонтной радиолокационной станции.

Ключевые слова: радиолокационная станция, отношение сигнал/помеха, ширина диаграммы направленности, ширина зоны обзора, площадь подстилающей поверхности, эффективная площадь рассеяния.

ВВЕДЕНИЕ

Основная задача обзорных загоризонтных радиолокационных систем ионосферного распространения заключается в обнаружении и сопровождении объектов [1]. Ионосферные загоризонтные радиолокационные системы (ЗГ РЛС) могут широко использоваться как в оборонных, так и в гражданских целях для обнаружения (наблюдения) объектов различных классов, таких как, например, самолеты и надводные корабли. Кроме задач наблюдения ионосферные ЗГ РЛС могут быть также задействованы в сфере дистанционного зондирования, в том числе в интересах проведения океанографических или ионосферных исследований [2]. В этом случае полезными являются сигналы, отраженные от естественных объектов (поверхности), в то время как сигналы, отраженные от техногенных объектов (скрытые цели), создают мешающие отражения.

Сущность выполнения процедуры радиолокационного обнаружения объекта заключается в принятии решения о наличии или отсутствии сигнала в каждом выделенном участке пространства с минимально допустимыми вероятностями принятия ошибочных решений [1]. В неблагоприятных условиях, при наличии мешающих помех, основным показателем эффективности обнаружения целей радиолокационной станцией становится величина отношения сигнал/помеха.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАГОРИЗОНТНОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ НА РЕЗУЛЬТАТИВНОСТЬ ОБНАРУЖЕНИЯ НАЗЕМНОЙ ЦЕЛИ НА ФОНЕ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Общепринятая форма уравнения радиолокации [1, 3] может быть представлена в следующем виде:

$$\frac{S}{N} = \frac{P_{ave} G_t G_r T \lambda^2 \sigma F_p}{N_0 J (4\pi)^3 R^4}, \quad (1)$$

где P_{ave} – средняя мощность передатчика;
 G_t – коэффициент усиления передающей антенны;
 G_r – коэффициент усиления приемной антенны;
 σ – эффективная площадь рассеяния цели;
 F_p – постоянная распространения;
 N_0 – спектральная плотность мощности шума;
 J – суммарные потери в среде распространения и аппаратуре;
 T – эффективное время накопления;
 λ – длина рабочей волны;
 R – наклонная дальность.

Множитель R в формуле (1) характеризует длину пути ионосферного сигнала в одну сторону от радиолокационной станции (РЛС) до цели с переотражением его от ионосферы. Использование в загоризонтных РЛС обзора земной поверхности в качестве среды распространения ионосферы вызывает определенные трудности в ходе проектирования подобного рода систем, в частности, при определении реальной пространственной траектории радиолокационного сигнала РЛС.

Значение средней мощности P_{ave} , излучаемой передающей системой РЛС, может изменяться в большом диапазоне.

При увеличении мощности передатчика улучшается отношение сигнал/помеха и, как следствие, чувствительность радара в условиях мешающего воздействия шумов. На практике это существенным образом повышает эффективность обнаружения целей, контрастирующих с фоновыми образованиями, особенно радиолокационных объектов с небольшой эффективной площадью рассеяния (ЭПР).

Коэффициент усиления антенн РЛС (на прием) определяется как произведение коэффициента направленного действия (КНД) D и коэффициента полезного действия (КПД) η антенны (отношение мощности, отдаваемой в нагрузку, ко всей активной мощности, получаемой антенной) [5]:

$$G_r = D\eta. \quad (2)$$

В современных антенных решетках коэффициент полезного действия достигает значения 0,95.

Факторы усиления решетки связаны с шириной основного лепестка диаграммы направленности. Коэффициент направленного действия D определяется шириной главного лепестка диаграммы направленности на уровне половинной мощности.

Для инженерной оценки КНД по ширине главного лепестка диаграммы направленности можно воспользоваться следующей формулой [4]:

$$D \approx \frac{26000}{\varphi_1 \times \varphi_2} \text{ [дБ]}, \quad (3)$$

где φ_1 – ширина диаграммы направленности антенны в вертикальной плоскости;
 φ_2 – ширина диаграммы направленности антенны в горизонтальной плоскости.

Ширина диаграммы направленности антенной решетки, в свою очередь, может быть определена по формуле [1, 5]

$$\Delta\varphi = 0,89 / L \text{ [рад.]}, \quad (4)$$

где L – длина апертуры антенны.

В качестве исходных данных, для проведения расчетов, использовались следующие характеристики: длина апертуры антенны $L = 900$ м, длина волны $\lambda = 20$ м.

Подставляя известные значения в формулу (4), получаем расчетное значение ширины диаграммы направленности антенны:

$$\Delta\varphi = 0,89 / L = 0,02 \text{ рад.}$$

Для расчета коэффициента усиления приемной антенны использовалась формула (2) с учетом допущения о равной ширине пространственной диаграммы направленности в обеих плоскостях, тогда

$$G_r = D\eta = \frac{26000}{\varphi_1 \times \varphi_2} \times \eta = 42,85 \text{ дБ.}$$

Помимо собственных (тепловых) шумов приемно-передающего тракта негативное влияние на эффективность обнаружения полезного сигнала, отраженного от цели, оказывают мешающие отражения от подстилающей поверхности.

Для сравнительного оценивания результативности обнаружения целей необходимо рассчитать площадь рассеивающего участка в пределах зоны обзора, которая формирует мешающий фоновый отраженный сигнал, принимаемый рассматриваемой РЛС.

Указанная площадь рассеивающего участка определяется главным образом шириной зоны обзора по дальности и поперечному сечению.

На рис. 1 представлена геометрическая интерпретация процесса формирования зоны приема РЛС в пространстве.

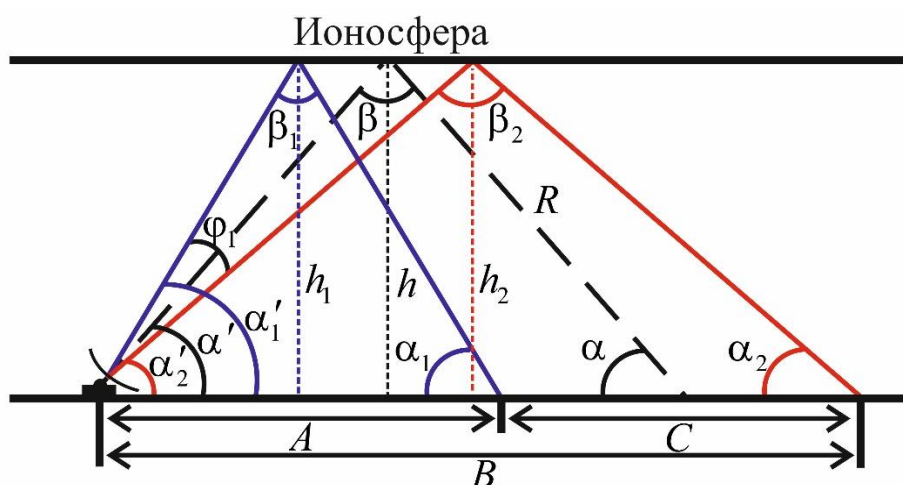


Рис. 1. Геометрическая интерпретация процесса формирования зоны приема РЛС в пространстве

На рис. 1 использованы следующие обозначения: α – угол визирования, α_1 и α_2 – углы падения луча в ближней и дальней зонах, φ_1 – ширина диаграммы направленности, h – высота ионосферного слоя, R – компонента наклонной дальности, C – зона обзора, A – дальность от приемной станции до ближней границы зоны обзора, B – расстояние от приемной станции до дальней границы зоны обзора.

При проведении расчетов использовалась высота ионосферного слоя F_2 . Слой F_2 обычно отражает самые высокочастотные сигналы. Этим зачастую обусловлен ряд эксплуатационных преимуществ ЗГ РЛС, включая более низкий уровень шумового фона, более высокое пространственное разрешение и, следовательно, улучшение характеристик обнаружения малоразмерных целей. Также поддерживаются высокие уровни ионизации за счет механизмов

переноса плазмы, что оказывается достаточным для эффективной работы ЗГ РЛС. Электронная концентрация в слое F_2 может быть на один или два порядка выше, чем в обычном слое E . На средних широтах максимальная электронная плотность слоя F_2 имеет место в интервале высот 210–350 км, хотя в экваториальной области она значительно выше. Так как слой F_2 наиболее высотный, он обеспечивает наибольшую наземную дальность для однокачкового распространения радиосигнала. В частности, по сравнению со слоем E распространение радиосигнала с отражением от слоя F_2 увеличивает дальность действия ЗГ РЛС до 3000 км. Слой F_2 всегда присутствует в дневное и в ночное время, что обеспечивает круглосуточный режим работы ЗГ РЛС. Таким образом, для ЗГ РЛС и прочих КВ-систем, использующих эффект отражения ЭМВ от ионосферы, наиболее важным является слой F_2 .

В качестве примера рассматривается статическая цель с ЭПР $\sigma_{\text{цели}} = 45000 \text{ м}^2$ (ЭПР наливной баржи) на дальности $R = 3000 \text{ км}$ при высоте ионосферного слоя $F_2 = 300 \text{ км}$. При этом угол визирования α рассчитывается по следующей формуле:

$$\alpha = \alpha' = \arcsin\left(\frac{2h}{R}\right) = 0,2014 \text{ рад.} \quad (5)$$

Для определения горизонтальной дальности до ближней границы зоны обзора A рассчитаем угол α'_1 :

$$\alpha'_1 = \alpha' + \left(\frac{\varphi_1}{2}\right) = 0,2112 \text{ рад.}, \quad (6)$$

где φ_1 – ширина диаграммы направленности антенны в вертикальной плоскости. Затем рассчитаем угол отражения от слоя ионосферы β_1 :

$$\beta_1 = \pi - (\alpha'_1 + \alpha_1) = 2,7191 \text{ рад.}, \quad (7)$$

тогда дальность до ближней границы зоны обзора $A = (h_1 \times \text{tg}\left(\frac{\beta_1}{2}\right)) \times 2 = 2798 \text{ км}$.

Аналогичным образом рассчитывается горизонтальная дальность до дальней границы зоны обзора B :

$$\alpha'_2 = \alpha' - \left(\frac{\varphi_1}{2}\right) = 0,1915 \text{ рад.},$$

$$\beta_2 = \pi - (\alpha'_2 + \alpha_2) = 2,7586 \text{ рад.},$$

$$B = h_2 \text{tg}\beta_2 = 3095 \text{ км.}$$

При этом максимальная ширина зоны обзора по дальности

$$C = B - A = 297 \text{ км.}$$

Максимальная ширина зоны обзора по поперечному сечению D рассчитывается по формуле [5]

$$D = R \times \varphi_2 = 59 \text{ км.} \quad (8)$$

В первом приближении площадь рассеивающего участка $S_{\text{пов}}$ составляет

$$S_{\text{пов}} = D \times C = 17620 \text{ км}^2.$$

Входной сигнал в приемнике ЗГ РЛС, формируемый подстилающей поверхностью, посто-

янно флюктуирует. Флюктуации вызваны множественными радиолокационными отражениями от элементарных участков травы, кустарника, леса, пашни, волн на водной поверхности [5]. В этом случае ЭПР подстилающей поверхности с элементарными отражателями рассчитывается по формуле

$$\sigma_{\text{пов}} = S_{\text{пов}} \sigma_{\text{уд}} = 47,231 \text{ дБ}, \quad (9)$$

где $\sigma_{\text{уд}}$ – удельная ЭПР сопутствующих образований подстилающей поверхности. В качестве примера использована удельная ЭПР морской поверхности

$$\sigma_{\text{уд}} = 3 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{м}^2.$$

Обнаруживаемая на фоне подстилающей поверхности цель имеет индивидуальные геометрические размеры и, как следствие, соответствующие индивидуальные отражающие характеристики. ЭПР цели и сопутствующей ей подстилающей поверхности рассчитывается по формуле

$$\sigma = (S_{\text{пов}} - S_{\text{цели}}) \times \sigma_{\text{уд}} + \sigma_{\text{цели}} = 47,235 \text{ дБ}, \quad (10)$$

где $S_{\text{пов}}$ – площадь подстилающей поверхности;
 $S_{\text{цели}}$ – площадь цели в картинной плоскости;
 $\sigma_{\text{цели}}$ – ЭПР цели.

В первом приближении вычисление отношения сигнал/помеха на выходе приемного устройства может быть выполнено непосредственной подстановкой в уравнение (1) числовых значений соответствующих переменных.

Уравнение (1) удобно представить в логарифмической форме, в которой числовые значения всех членов выражены в логарифмических единицах, т. е. в децибелах. Тогда

$$\frac{S}{N} = \{P_{\text{ave}} + G_r + G_t + T + \lambda^2 + \sigma + F_p\} - \{10 \log(4\pi)^3 + L + N_0 + R^4\} [\text{дБ}]. \quad (11)$$

Рассматриваемая в нашем случае РЛС имеет среднюю мощность передачи $P_{\text{ave}} = 500$ кВт (56,9897 дБВт), функционирует на несущей частоте $f_c = 15$ МГц с коэффициентом усиления передающей антенны $G_t = 20$ дБ при постоянной распространения $F_p = 3$ дБ, спектральной плотности мощности внешнего шума $N_0 = -185$ дБВт/Гц, суммарных потерях (тракт и аппаратура) $J = 16$ дБ и эффективном времени накопления сигнала $T = 1$ с.

Подставляя данные числовые значения в формулу (10), получим значение отношения сигнал/помеха для облучаемой местности без цели:

$$\frac{S}{N} = 73,021 \text{ дБ} \quad (12)$$

и при наличии цели в пределах зоны обзора

$$\frac{S}{N} = 73,025 \text{ дБ}. \quad (13)$$

Полученного отношения сигнал/помеха недостаточно для обнаружения цели. Разница составляет всего 0,004 дБ.

Увеличения отношения сигнал/помеха на выходе приемного устройства добиваются уменьшением зоны обзора радиолокационной станции, изменяя ширину диаграммы направленности антенной системы.

В табл. 1 приведены результаты вычисления отношения сигнал/помеха, полученные путем изменения ширины ДНА.

Таблица 1

Результаты вычислений отношения сигнал/помеха

С целью		Без цели		Площадь зоны обзора, м ²	Ширина ДНА, градусы
Отношение сигнал/помеха, дБ	Отношение сигнал/помеха, раз	Отношение сигнал/помеха, дБ	Отношение сигнал/помеха, раз		
73,0251	2,0068e ⁷	73,0213	2,0051e ⁷	17619746573	1,1324
73,1060	2,0446e ⁷	73,0114	2,0005e ⁷	703181877	0,2265
73,3778	2,1766e ⁷	73,0111	2,0004e ⁷	175782937	0,1132
73,7965	2,3969e ⁷	73,0110	2,0003e ⁷	78124718	0,0755
74,3223	2,7054e ⁷	73,0110	2,0003e ⁷	43944951	0,0566
74,9163	3,1019e ⁷	73,0110	2,0003e ⁷	28124709	0,0453
75,5469	3,5866e ⁷	73,0110	2,0003e ⁷	19531025	0,0377
76,1904	4,1595e ⁷	73,0110	2,0003e ⁷	14349314	0,0324
76,8309	4,8204e ⁷	73,0110	2,0003e ⁷	10986189	0,0283
77,4582	5,5695e ⁷	73,0110	2,0003e ⁷	8680443	0,0252
78,0664	6,4068e ⁷	73,0110	2,0003e ⁷	7031157	0,0226
78,6523	7,3321e ⁷	73,0110	2,0003e ⁷	5810873	0,0206
79,2146	8,3456e ⁷	73,0110	2,0003e ⁷	4882747	0,0189
79,7530	9,4472e ⁷	73,0110	2,0003e ⁷	4160446	0,0174
80,2682	1,0637e ⁸	73,0110	2,0003e ⁷	3587323	0,0162
80,7609	1,1915e ⁸	73,0110	2,0003e ⁷	3124957	0,0151
81,2322	1,3281e ⁸	73,0110	2,0003e ⁷	2746544	0,0142
81,6835	1,4735e ⁸	73,0110	2,0003e ⁷	2432925	0,0133
82,1158	1,6277e ⁸	73,0110	2,0003e ⁷	2170109	0,0126
82,5304	1,7908e ⁸	73,0110	2,0003e ⁷	1947688	0,0119
82,9283	1,9626e ⁸	73,0110	2,0003e ⁷	1757788	0,0113
83,3108	2,1433e ⁸	73,0110	2,0003e ⁷	1594366	0,0108

Из расчетов (табл. 1) видно, что для превышения отношения сигнал/помеха в два раза необходимо иметь ширину ДНА, равную 0,0324°, а для превышения в десять раз, ширина ДНА должна составить 0,0108°. Представленных результатов можно добиться только при идеальных условиях и при точном определении направления местоположения интересующего объекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные в соответствии с представленной методикой расчеты указывают на возможность обнаружения цели с использованием значения порога принятия решения выше порогового уровня шумов (при фиксированном уровне ложных тревог).

В статье представлены результаты расчетов отношения сигнал/помеха (табл. 1), которые показывают, какую ширину луча ДНА необходимо обеспечить для обнаружения цели с учетом требуемого порога принятия решения.

Разработанная методика оценки влияния характеристик загоризонтной радиолокационной станции позволяет рассчитать требуемые геометрические характеристики антенной системы и пространственные параметры ее диаграммы направленности для получения необходимых значений сигнал/помеха, которые могут быть использованы при формировании технического облика антенного комплекса перспективных РЛС.

Список используемых источников

1. Белоцерковский Г.Б. Основы радиолокации и радиолокационные устройства. – М.: Сов. радио, 1975. – 336 с.

2. *Фабрицио Джузеппе А.* Высокочастотный загоризонтный радар: основополагающие принципы, обработка сигналов и практическое применение. – М.: Техносфера, 2018. – 936 с.
3. Основы загоризонтной радиолокации / В.А. Алебастров, Э.Ш. Гойхман, И.М. Заморин и др. – М.: Радио и связь, 1984. – 256 с.
4. *Алебастров В.А., Борсоев В.А., Шустов Э.И.* Развитие отечественной загоризонтной радиолокации. – М., 2016 – 248 с.
5. Теоретические основы радиолокации: учеб. пособие для вузов / А.А. Коростелев, Н.Ф. Клюев, Ю.А. Мельник и др.; под ред. В.Е. Дулевича. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Сов. радио, 1978. – 608 с.

К.В. Бакурский,
кандидат техн. наук;
Т.О. Мысливцев,
доктор техн. наук, доцент;
В.Н. Цыкунов

ОЦЕНКА ИНТЕРВАЛОВ НАБЛЮДЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ ЕСТЕСТВЕННОГО КОСМИЧЕСКОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ НА БОРТУ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Для повышения автономности частотно-временного обеспечения навигационных космических аппаратов (НКА) глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС предлагается использовать сигналы источников естественного космического радиоизлучения (ИЕКР).

Приведена оценка интервалов наблюдения ИЕКР на различных высотах над уровнем моря и в околоземном космическом пространстве для формирования автономной бортовой шкалы времени космического аппарата.

Ключевые слова: бортовая шкала времени, источник естественного космического радиоизлучения.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время осуществляется интенсивное совершенствование спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС. Одними из направлений поддержания и повышения ее точностных характеристик являются развитие функциональных дополнений, увеличение количества средств контроля и совершенствование фундаментального обеспечения на основе радиоинтерферометрии с сверхдлинной базой (РСДБ), а также создание шкалы времени на основе приема ИЕКР.

Наибольшие успехи в изучении возможностей применения излучения ИЕКР, таких как квазары и пульсары, связаны с использованием стабильности их параметров и доступностью регистрации принимаемого радиоизлучения [1].

Радиоизлучение пульсаров представляет собой периодическую последовательность импульсов, которая обладает уникальной формой и высокостабильными параметрами повторения при ее усреднении. Высокая добротность пульсаров указывает, что они удовлетворяют требованиям, предъявляемым к временным стандартам или к шкалам времени [2].

На сегодняшний день обосновывается возможность использования излучения пульсаров в радио-, рентгеновском и видимом диапазонах волн для задач автономной навигации в космосе и обеспечения потребителей частотно-временной информацией.

В статье проводится сравнительное оценивание возможности приема излучения пульсаров на различных высотах над уровнем моря и в околоземном космическом пространстве.

ПРИЕМ ИЗЛУЧЕНИЯ ПУЛЬСАРОВ

На прием излучения пульсаров на Земле сильное влияние оказывает среда распространения. Имея широкий спектр, радиоимпульс излучения пульсара претерпевает рассеяние, временную дисперсию при его распространении в межзвездной среде.

Момент прихода импульсов излучения пульсара принято относить к барицентру Солнечной системы и сравнивать его с расчетным временем, которое вычисляется на основе предварительно известных координат. При этом учитывается ряд астрономических поправок, связанных с собственным движением и параллаксом пульсара, релятивистского запаздыва-

ния радиосигналов в гравитационном поле Солнечной системы, межзвездной среде, ионосфере и тропосфере Земли [3].

Ряд поправок можно исключить, если прием излучения пульсаров организовать в околоземном космическом пространстве.

С нашей точки зрения, излучения пульсаров целесообразно использовать для создания на борту КА высокоточной автономной бортовой шкалы времени. Для этого необходимо оценить интервалы наблюдения пульсаров на различных высотах над уровнем моря и в околоземном космическом пространстве.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Произведем оценку интервалов наблюдения пульсаров. С целью оценивания выберем группу пульсаров, имеющих наибольшее значение спектральной плотности потока излучения, для оптимального приема и наименьшее значение периода следования импульсов $P_0 < 1$ мкс. Выбранные для оценивания пульсары с характеристиками представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики оцениваемых пульсаров

i , пульсар	α_i , град	δ_i , град	P_0 , с	S_{400} , мЯн
J0218+4232	47,05	27,01	0,002323091	35
J1713+0747	256,66	30,70	0,004570137	36
B1821-24A	275,56	-1,55	0,003054316	40
J1730-2304	263,19	0,19	0,008122798	43
J1643-1224	251,08	9,7783313	0,004621642	75
J2145-0750	326,02	5,31	0,016052424	100
J1939+2134	42,3	57,51	0,001557807	240
J0437-4715	50,47	-67,87	0,005757452	550

В таблице используются следующие обозначения:

α_i – угол склонения;

δ_i – угол восхождения;

i – номер пульсара;

S_{400} – спектральная плотность потока излучения на частоте 400 МГц, выраженная в янских

($1 \text{ мЯн} = 10^{-29} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{Гц}}$).

Зададим положение КА координатами (широта ϕ , долгота λ и высота h) и оценим интервалы наблюдения выбранных пульсаров при их известных координатах.

Определим координаты КА в относительной геоцентрической системе координат $\vec{r}_{\text{КА}} = [x, y, z]$ при заданных значениях его широты ϕ , долготы λ и высоты h .

Вектор, соединяющий центр Земли и КА, будет иметь длину $l = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$.

Направление на i -й пульсар, определяемое углами склонения α_i и восхождения δ_i , находится по выражениям в Международной небесной системе координат:

$$\vec{u}_i \approx \begin{bmatrix} \cos \delta_i \cos \alpha_i \\ \cos \delta_i \sin \alpha_i \\ \sin \delta_i \end{bmatrix}. \quad (1)$$

С учетом вращения Земли координаты КА будут определяться вектором $\vec{r}_{КА}$ с координатами:

$$\begin{aligned}x_{КА} &= x \cos \omega t - y \sin \omega t; \\y_{КА} &= y \cos \omega t + x \sin \omega t; \\z_{КА} &= z.\end{aligned}\quad (2)$$

где t – звездное время;

ω – угловая скорость вращения Земли, равная $0,74 \cdot 10^{-4}$ рад/с.

Определим орт $\vec{r}_{КА0}$ вектора $\vec{r}_{КА}$ с учетом вращения Земли:

$$\vec{r}_{КА0} = \vec{r}_{КА} / l.$$

Косинус угла между векторами $\vec{r}_{КА}$ и \vec{u}_i определяется выражением

$$\cos \gamma = \vec{r}_{КА0} \cdot \vec{u}_i = \frac{1}{l} \begin{bmatrix} \cos \delta_i \cos \alpha_i \\ \cos \delta_i \sin \alpha_i \\ \sin \delta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \cos \omega t - y \sin \omega t \\ y \cos \omega t + x \sin \omega t \\ z \end{bmatrix}. \quad (3)$$

На поверхности Земли пульсар будет наблюдаться, если он не находится в зоне радиотени – области 1 (рис. 1).

На орбите с высотой $h_{КА}$ пульсар будет наблюдаться до тех пор, пока угол между направлениями на пульсар и КА будет меньше:

$$\gamma < (90^\circ + \theta),$$

где θ – угол между направлением на КА и перпендикуляром к направлению на пульсар (угол между вектором $\vec{r}_{КА0}$ и перпендикуляром к вектору \vec{u}_i). Угол θ выбирается таким, чтобы исключить влияние атмосферы на принимаемое излучение пульсара в области 2.

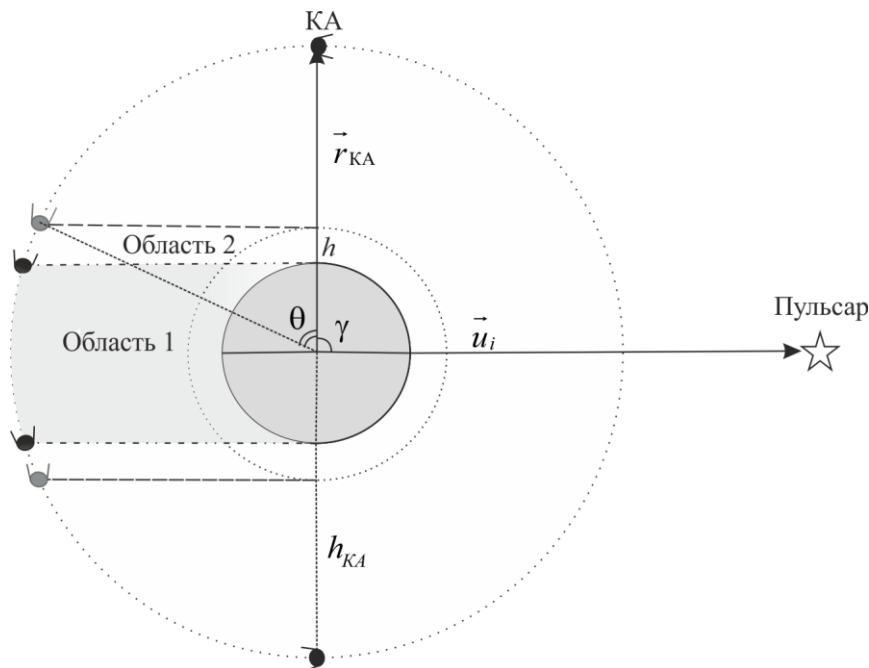


Рис. 1. Схема наблюдения пульсара

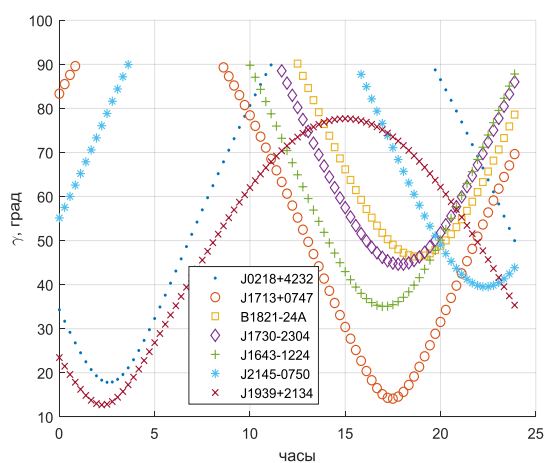
В табл. 2 представлены результаты оценки интервалов наблюдения пульсаров в виде коэффициентов, значение которых соответствует доле видимости на 24-часовом интервале, на различных высотах над уровнем моря с координатами широты $\phi = 45^\circ$, долготы $\lambda = 10^\circ$.

Таблица 2

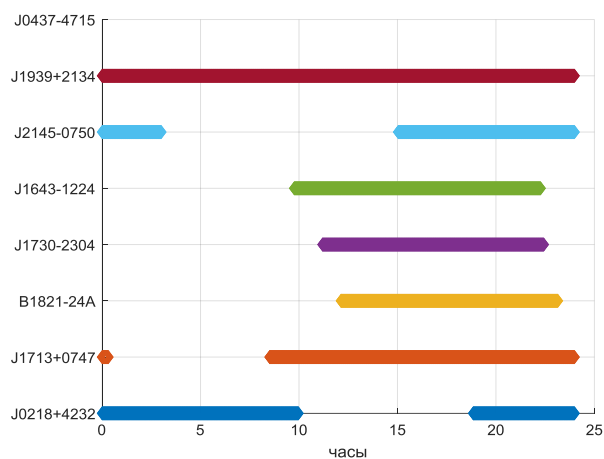
Результаты моделирования оценки интервалов наблюдения пульсаров

h , метры	J0218 +4232	J1713 +0747	B1821 -24A	J1730 -2304	J1643 -1224	J2145 -0750	J1939 +2134	J0437- 4715
На различных высотах над уровнем моря								
100	0,62	0,65	0,45	0,46	0,52	0,49	1,00	0,00
1000	0,63	0,66	0,46	0,47	0,52	0,50	1,00	0,00
36000	0,68	0,71	0,50	0,51	0,56	0,54	1,00	0,00
Околосземное космическое пространство								
100000	0,72	0,76	0,53	0,54	0,59	0,57	1,00	0,00
1000000	1,00	1,00	0,70	0,71	0,79	0,75	1,00	0,18
36000000	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

На рис. 2 и рис. 3 показана оценка интервалов наблюдения выбранных пульсаров. КА предполагается на различных высотах с координатами $\phi = 45^{\circ}$, $\lambda = 10^{\circ}$.

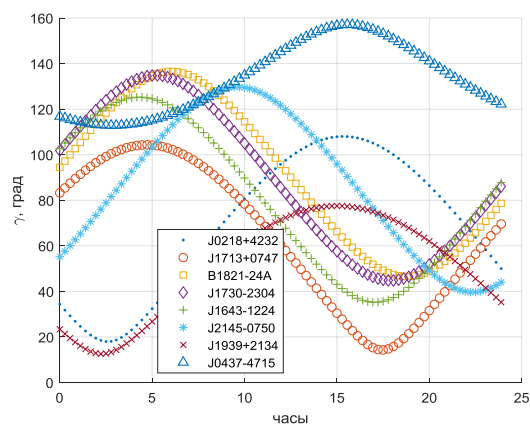


а)

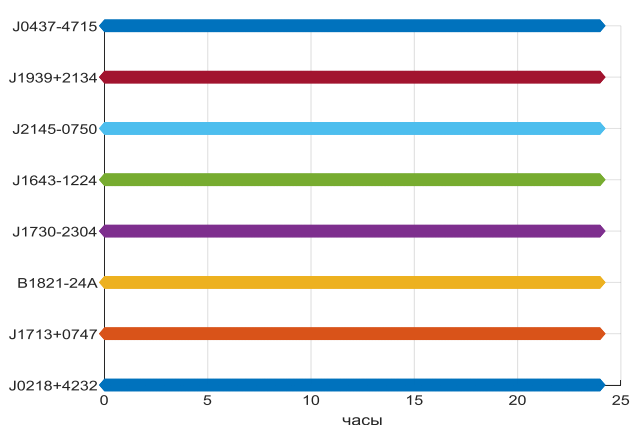


б)

Рис. 2. Оценка интервала наблюдения на высоте $h = 1000$ м на интервале 24 ч:
а — изменение угла γ ; б — интервал наблюдения



а)



б)

Рис. 3. Оценка интервала наблюдения на высоте $h = 36 \times 10^6$ м на интервале 24 ч:
а — изменение угла γ ; б — интервал наблюдения

Результаты моделирования позволяют сделать вывод, что наибольший интервал наблюдения пульсаров соответствует положению КА на орбите с высотой $h = 36 \times 10^6$ м. При заданной высоте орбиты КА будет наблюдаться постоянно средствами наземного комплекса управления с определенной территории Земли для осуществления контроля приема излучения пульсаров на борту.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведены результаты моделирования оценки наблюдения пульсаров на различных высотах над уровнем моря и в околоземном космическом пространстве.

Определена наилучшая высота для непрерывного приема излучения пульсаров.

Предложен выбор высоты орбиты КА, что позволит:

- непрерывно принимать излучение пульсаров;
- исключить ряд астрономических поправок, которые необходимо учитывать при приеме излучения на Земле.

При выполнении данных условий появляется возможность формирования стабильной автономной бортовой шкалы времени на основе приема излучения пульсаров.

Список используемых источников

1. Авраменко А.Е. Нейтронная звезда: от экстремальной турбулентности вспышки сверхновой к эталонной монотонности когерентного излучения пульсара // Вестник МГТУ имени Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. – 2015. – № 5 – С.25–35.
2. Пульсарная шкала времени / В.Е. Жаров, В.В. Орешко, В.А. Потапов и др. // Астрономический журнал. – 2019. – Т. 96, № 2 – С. 120–143.
3. Авраменко А.Е. Пульсар: Природный эталон времени – пространства. – М.: Ленанд, 2015. – 164 с.

Д.А. Булекбаев,
доктор техн. наук, доцент;
В.М. Лихачев,
доктор техн. наук, профессор;
В.А. Проданец,
кандидат техн. наук, доцент

ДИФРАКЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН НА РАДИОПРОЗРАЧНЫХ КЛИНОВИДНЫХ ТЕЛАХ В ЗАДАЧАХ ПРИКЛАДНОЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ И РАДИОЛОКАЦИИ

В статье представлены теоретические основы метода построения точного решения задачи о дифракции плоской электромагнитной волны на однородном радиопрозрачном (диэлектрическом) клине с полубесконечными гранями. Определяемое решение есть решение граничной задачи математической теории дифракции с произвольной поляризацией возбуждаемых электромагнитных полей в квазиоптическом частотном диапазоне.

В работе рассматриваются: постановка задачи и способ приведения ее к системе функциональных уравнений относительно некоторых функций комплексного переменного, мероморфных в некоторых полосах, с предполагаемой подстановкой найденных мероморфных функций в соответствующие интегралы и с получением решений поставленной задачи дифракции во внешней и внутренней клиновидных областях.

Ключевые слова: дифракция, радиопрозрачный, диэлектрический, квазиоптический диапазон, плоская волна, мероморфные функции, функциональные уравнения, интегралы Зоммерфельда.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из ключевых проблем прикладной электродинамики, которую требуется решить при расчете электромагнитных полей, возбуждаемых реальными объектами сложной архитектуры с различными электрическими характеристиками поверхности, является решение задачи о дифракции электромагнитных волн (ЭМВ) на диэлектрических (радиопрозрачных) клиновидных структурах.

В классе задач, которые решаются с применением радиотехнических методов и средств, одними из основных являются задачи радиолокации. Для успешного решения любой задачи радиолокации требуется знать пространственно-временные характеристики полей дифракции ЭМВ, рассеянных лоцируемым объектом в окружающее пространство.

Объекты локации, как правило, имеют сложную архитектуру и форму поверхности, содержащей, в частности, многочисленные клиновидные образования (угловые области): изломы поверхности; острые кромки; ребра с радиусами закругления, много меньшими длины волны зондирующего сигнала. Объекты локации имеют большие электрические размеры по сравнению с длиной падающей ЭМВ. Их покрытия обладают различными радиофизическими свойствами и в частности могут быть радиопрозрачными. Поэтому для решения задач радиолокации необходимо знание алгоритмов расчета дифракционных полей ЭМВ, возбуждаемых и рассеиваемых различными участками поверхности объектов и в том числе клиновидными структурами, так как они являются одними из основных факторов рассеяния ЭМВ.

При исследовании процессов дифракции ЭМВ на реальных объектах радиолокации необходимо сопоставить каждому объекту адекватную электродинамическую модель. При этом различные части поверхности объекта аппроксимируются поверхностями, имеющими такие геометрические формы и радиофизические свойства, для которых известны аналитические решения соответствующих модельных задач дифракции ЭМВ различных типов и поляриза-

ции. Гладкие участки корпуса аппроксимируются диэлектрическими, импедансными или идеально проводящими каноническими поверхностями.

Угловые образования на поверхности, острые кромки, ребра аппроксимируются идеально проводящими, импедансными или диэлектрическими (радиопрозрачными) клиновидными структурами.

В случае больших линейных размеров объекта локации поле, рассеянное его поверхностью в пространство, ищут в точке наблюдения в виде суперпозиции электромагнитных полей, рассеянных отдельными частями поверхности тела.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О ДИФРАКЦИИ ПЛОСКОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОМ КЛИНЕ

Одной из главных модельных задач локации, лежащих в основе указанной выше электродинамической проблемы, является задача о дифракции плоской ЭМВ определенной поляризации на диэлектрическом (радиопрозрачном) клине с полубесконечными гранями.

Ранее предпринимались попытки получить приближенные решения указанной задачи. Однако эти решения не позволяли построить конкретные алгоритмы численного расчета дифракционных полей, проанализировать физику процесса дифракции и поведение отдельных составляющих поля дифракции, возбуждаемого диэлектрическим клином в его внешней и внутренней областях.

В настоящей работе получено строгое (точное) решение задачи о дифракции плоской ЭМВ на диэлектрическом клине. Оно является дальнейшим развитием метода теории распространения волн в клиновидных областях. Указанный метод основан на представлении решения граничной задачи в форме интеграла типа интеграла Зоммерфельда, с помощью которого ранее были получены строгие решения задач о дифракции плоских и цилиндрических ЭМВ на идеально проводящих (граничные задачи Дирихле и Неймана) и импедансных (краевые задачи с граничными условиями третьего типа) клиновидных образованиях в квазиоптическом частотном диапазоне.

Рассмотрим задачу о дифракции плоской электромагнитной волны на диэлектрическом (радиопрозрачном) клине как граничную задачу математической теории дифракции.

Пусть пространство R^3 разделено клиновидной поверхностью, образованной двумя полуплоскостями (границы) с общей границей (ребро), на две угловые области Γ_1 и Γ_2 (соответственно I и II среды). Введем в R^3 цилиндрическую систему координат (r, φ, z) так, чтобы ось Oz совпадала с ребром клина. Тогда положение граней определяется уравнениями $\varphi = \pm\Phi$, при этом полагаем $\Phi \in \left[\frac{\pi}{2}, \pi\right]$. В данном случае области Γ_1, Γ_2 (I и II среды) определяются множествами точек:

$$\Gamma_1 = \{(r, \varphi, z) : -\Phi \leq \varphi \leq \Phi, r \geq 0, z \in R\}; \quad \Gamma_2 = \{(r, \varphi, z) : \Phi \leq \varphi \leq 2\pi - \Phi, r \geq 0, z \in R\}.$$

Угловые области Γ_1 (среда I) и Γ_2 (среда II) характеризуются различными электрическими параметрами: относительными диэлектрическими проницаемостями $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ и магнитными проницаемостями μ_1, μ_2 соответственно. Среды I и II возбуждаются плоской ЭМВ, распространяющейся в среде I (падающая ЭМВ; рис. 1).

Полагаем, что временная зависимость (временная составляющая) всех исследуемых электромагнитных полей определена множителем $e^{-i\omega t}$. В дальнейшем будем рассматривать стационарные электромагнитные поля, не содержащие указанного временного сомножителя.

Как известно, ЭМВ, облучающие реальные объекты, имеют определенную поляризацию. Возникающее при этом поле дифракции можно представить в виде двух ортогонально поляризованных электромагнитных полей, характеризующихся E - и H -поляризациями. В случае E -поляризации комплексная амплитуда $\dot{\vec{E}}$ вектора напряженности электрического поля параллельна ребру: $\dot{\vec{E}} = \dot{E}_z \vec{e}_z$ (рис. 1), $(\vec{e}_r, \vec{e}_\varphi, \vec{e}_z)$ – ортонормированный базис цилиндрической системы координат. Амплитуда $\dot{\vec{H}}$ вектора напряженности магнитного поля – ортогональна $\dot{\vec{E}}$. В случае H -поляризации $\dot{\vec{H}} = \dot{H}_z \vec{e}_z$, вектор $\dot{\vec{E}}$ ортогонален $\dot{\vec{H}}$ (рис. 1). Тогда $\dot{E}_z = \dot{E}_z(r, \varphi)$, $\dot{H}_z = \dot{H}_z(r, \varphi)$, где (r, φ) – полярные координаты точки наблюдения M , которая может находиться как в I, так и в II средах. Задача становится двумерной.

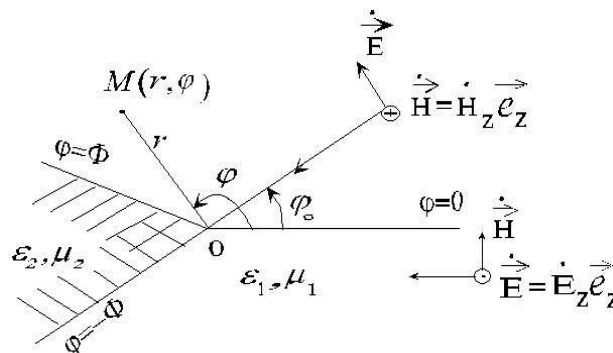


Рис. 1. Взаиморасположение точек падения и наблюдения относительно радиопрозрачного клина с учетом поляризаций

В целом векторы напряженности поля дифракции ЭМВ в случае E - и H -поляризаций определяются соответствующими векторными функциями: $\vec{E} = \dot{\vec{E}} e^{-i\omega t}$ и $\vec{H} = \dot{\vec{H}} e^{-i\omega t}$. Зная решение дифракционной задачи для этих двух основных типов поляризации и используя систему уравнений Максвелла, можно получить решение дифракционной задачи для любого типа поляризации.

Таким образом, рассматриваемая здесь задача дифракции заключается в определении составляющих $\dot{E}_{z1}(r, \varphi)$ и $\dot{E}_{z2}(r, \varphi)$ соответственно в I и II средах – в «электрическом» случае и составляющих $\dot{H}_{z1}(r, \varphi)$, $\dot{H}_{z2}(r, \varphi)$ соответственно в I и II средах – в «магнитном» случае. При этом рассматриваемая задача для каждого из указанных ранее типов поляризации является двумерной.

Такие составляющие, согласно [7], должны удовлетворять следующим условиям.

1. В «электрическом» случае в области Γ_1 функция \dot{E}_{z1} , а в области Γ_2 функция \dot{E}_{z2} должны удовлетворять уравнению Гельмгольца

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial E_{zv}}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_{zv}}{\partial \varphi^2} + k_v^2 \dot{E}_{zv} = 0, \quad (1)$$

где $v = 1, 2$, с различными волновыми числами $k_1 = \omega \sqrt{\varepsilon_1 \mu_1}$, $k_2 = \omega \sqrt{\varepsilon_2 \mu_2}$ (здесь ω – частота электромагнитных колебаний) соответственно в I и II средах.

Положим $\gamma = \frac{k_1}{k_2}$, тогда, если $k_2 = k$, то $k_1 = \gamma k$.

На клиновидной границе $S = \{(r, \varphi): \varphi = \Phi, \varphi = -\Phi, r \geq 0\}$ раздела I и II сред должны выполняться граничные условия:

$$\begin{cases} \dot{E}_{z1} = \dot{E}_{z2} \\ \frac{\partial \dot{E}_{z1}}{\partial \varphi} = \frac{\mu_1}{\mu_2} \frac{\partial \dot{E}_{z2}}{\partial \varphi} \end{cases} \text{ на } S. \quad (2)$$

2. В «магнитном» случае имеем аналогичные условия: в области Γ_1 функция \dot{H}_{z1} , а в области Γ_2 функция \dot{H}_{z2} должны удовлетворять уравнению Гельмгольца

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \dot{H}_{zv}}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \dot{H}_{zv}}{\partial \varphi^2} + k_v^2 \dot{H}_{zv} = 0, \quad (3)$$

$$v = 1, 2, \quad k_2 = k, \quad k_1 = \gamma k.$$

На клиновидной границе S раздела I и II сред должны выполняться граничные условия:

$$\begin{cases} \dot{H}_{z1} = \dot{H}_{z2} \\ \frac{\partial \dot{H}_{z1}}{\partial \varphi} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \frac{\partial \dot{H}_{z2}}{\partial \varphi} \end{cases} \text{ на } S. \quad (4)$$

Граничные условия (2), (4) реализуют равенство на S тангенциальных составляющих векторов напряженности электрического и магнитного полей, возбуждаемых плоской ЭМВ в областях Γ_1 и Γ_2 [7].

Кроме того, согласно [7], функции $\dot{E}_{z1}, \dot{E}_{z2}, \dot{H}_{z1}, \dot{H}_{z2}$ каждая в своей среде, I или II, должны удовлетворять условиям излучения на бесконечности:

$$\lim_{r \rightarrow +\infty} \sqrt{r} \left(\frac{\partial \dot{E}_{zv}}{\partial r} + ik \dot{E}_{zv} \right) = 0, \quad \lim_{r \rightarrow +\infty} \sqrt{r} \left(\frac{\partial \dot{H}_{zv}}{\partial r} + ik \dot{H}_{zv} \right) = 0, \quad v = 1, 2, \quad (5)$$

а также условиям на ребре:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{zv} &= O(r^\xi), r \rightarrow 0, \operatorname{Re} \xi > 0; \\ \dot{H}_{zv} &= O(r^\xi), r \rightarrow 0, \operatorname{Re} \xi > 0, v = 1, 2. \end{aligned} \quad (6)$$

Поле падающей волны в области Γ_1 (I среда) в «электрическом» случае

$$\dot{E}_{\text{зпад}} = A_z^E e^{i\gamma k r \cos(\varphi - \varphi_0)}, |\varphi_0| \leq \Phi; \quad (7)$$

в «магнитном» случае –

$$\dot{H}_{\text{зпад}} = A_z^H e^{i\gamma k r \cos(\varphi - \varphi_0)}, |\varphi_0| \leq \Phi. \quad (8)$$

В общем случае $\varepsilon_v = \varepsilon'_v + i\varepsilon''_v, \mu_v = \mu'_v + i\mu''_v, v = 1, 2$.

Для непоглощающей среды $\varepsilon''_v = 0, \mu''_v = 0$.

Тогда предлагаемая дифракционная задача в общей постановке для «электрического» и «магнитного» случаев формулируется как граничная задача следующим образом: определить соответственно в I и II средах функции $u(r, \varphi) = u_0(r, \varphi) + \tilde{u}(r, \varphi)$ и $\psi(r, \varphi) = \tilde{\psi}(r, \varphi)$, удовлетворяющие уравнениям Гельмгольца:

$$\Delta u + (\gamma k)^2 u = 0, \quad \Delta \psi + k^2 \psi = 0, \quad \Delta - \text{оператор Лапласа}, \quad (9)$$

граничным условиям:

$$\begin{cases} u|_{\varphi=\Phi-0} = \psi|_{\varphi=\Phi+0}; & u|_{\varphi=-\Phi+0} = \psi|_{\varphi=-\Phi-0} \\ \frac{\partial u}{\partial \varphi}|_{\varphi=\Phi-0} = \beta \frac{\partial \psi}{\partial \varphi}|_{\varphi=\Phi+0}; & \frac{\partial u}{\partial \varphi}|_{\varphi=-\Phi+0} = \beta \frac{\partial \psi}{\partial \varphi}|_{\varphi=-\Phi-0} \end{cases}, \quad (10)$$

условиям излучения и условиям на ребре для функций $u(r, \varphi)$, $\psi(r, \varphi)$, если

$$u_0(r, \varphi) = A e^{i\gamma k r \cos(\varphi - \varphi_0)}. \quad (11)$$

При этом в «электрическом» случае

$$u(r, \varphi) = \dot{E}_{z1}, u_0(r, \varphi) = \dot{E}_{z\text{пад}}, \quad \psi(r, \varphi) = \dot{E}_{z2}, \beta = \frac{\mu_1}{\mu_2}, A = A_z^E.$$

В «магнитном» случае

$$u(r, \varphi) = \dot{H}_{z1}, u_0(r, \varphi) = \dot{H}_{z\text{пад}}, \quad \psi(r, \varphi) = \dot{H}_{z2}, \beta = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}, A = A_z^H.$$

Метод, основанный на представлении решения граничной задачи в форме интеграла типа интеграла Зоммерфельда, применительно к рассматриваемой задаче дифракции плоской ЭМВ на диэлектрическом клине заключается в следующем. Если функции $u(r, \varphi)$, $\psi(r, \varphi)$ удовлетворяют условиям граничной задачи (9)–(11), то функции $u(r, \varphi)$ можно поставить в однозначное соответствие аналитическую функцию

$$u^*(w, \varphi) = -i\gamma k \sin w \int_0^\infty u(r, \varphi) e^{-i\gamma k r \cos w} dr, \quad (12)$$

которая является преобразованием Лапласа по переменной r , с заменой переменных $p = i\gamma k \cos w$. Функция $u^*(w, \varphi)$ комплексного аргумента w регулярна в полуполосе $\{w : 0 < \text{Re } w < \pi, \text{Im } w > 0\}$ при всех значениях $\varphi \in (-\Phi, \Phi)$, разрезана вдоль интервалов $(\frac{\pi}{2}, \pi)$, $(-\pi, -\frac{\pi}{2})$ и является нечетной функцией своего аргумента w . Определим функцию $U(w)$ следующего вида [4]:

$$U(w) = \frac{1}{2} \left\{ u^*(w, 0) + \left[u^*\left(\frac{w}{2}, \frac{w}{2}\right) - u^*\left(\frac{w}{2}, -\frac{w}{2}\right) \right] \right\}. \quad (13)$$

Функция $U(w)$ регулярна в полосе $|\text{Re } w| < \pi + \Phi$ с разрезами вдоль отрезков $(-\pi - \Phi, -\frac{\pi}{2} - \Phi)$, $(\frac{\pi}{2} + \Phi, \pi + \Phi)$. Определим далее оператор $Z_{\gamma k}$ как суперпозицию функций $u^*(w, \varphi)$ и $U(w)$. Оператор $Z_{\gamma k}$ однозначно отображает функцию $u(r, \varphi)$ (решение исходной задачи дифракции в области Γ_1) во вспомогательную функцию $U(w)$, т. е. $Z_{\gamma k} : u(r, \varphi) \rightarrow U(w)$.

Оператор $Z_k : \psi(r, \varphi) \rightarrow \Psi(w)$ [т. е. $\psi(r, \varphi) \rightarrow \psi^*(w, \varphi) \Delta \psi^*(w, \varphi) \rightarrow \Psi(w)$], однозначно отображающий функцию $\psi(r, \varphi)$ (решение исходной задачи дифракции в области Γ_2) во вспомогательную функцию $\Psi(w)$, определяется аналогично оператору $Z_{\gamma k}$ с волновым числом k ($\psi(r, \varphi) \rightarrow \psi^*(w, \varphi)$ по формуле вида (12), $\psi^*(w, \varphi) \rightarrow \Psi(w)$ по формуле вида (13).

Обратные преобразования в областях Γ_1 и Γ_2 есть интегралы Зоммерфельда вида [1, 5]:

$$u(r, \varphi) = \frac{1}{2\pi i} \int_C u^*(w, \varphi) e^{i\gamma k r \cos w} dw; \quad (14)$$

$$\psi(r, \varphi) = \frac{1}{2\pi i} \int_C \psi^*(w, \varphi) e^{i k r \cos w} dw. \quad (15)$$

Контур интегрирования C ($C = C_- UC_+$) показан на рис. 2. Интегралы (14), (15) понимаются в смысле главного значения.

Из равенства (13) в области Γ_1 имеем [4]

$$u^*(w, \varphi) = U(w + \varphi) - U(-w + \varphi). \quad (16)$$

Из равенства, аналогично (13) для функций $\psi^*(r, \varphi)$ и $\psi(w)$ в области Γ_2 , имеем

$$\psi^*(w, \varphi) = \psi(w + \pi - \varphi) - \psi(-w + \pi - \varphi). \quad (17)$$

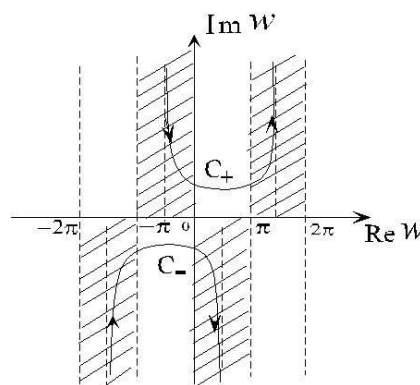


Рис. 2. Контур интегрирования

Структура операторов $Z_{\gamma k}$ и Z_k такова, что функции $U(w)$, $\Psi(w)$ обладают определенной четностью, которая, согласно методу Зоммерфельда – Малюжинца, имеет место в соответствии со следующими условиями. Функции $u(r, \varphi)$ и $\psi(r, \varphi)$, являющиеся решением исходной дифракционной задачи, представляют собой линейную комбинацию четных $u^{\text{ч}}(r, \varphi)$, $\psi^{\text{ч}}(r, \varphi)$ и нечетных $u^{\text{нч}}(r, \varphi)$, $\psi^{\text{нч}}(r, \varphi)$ по аргументу φ составляющих. При этом для четных составляющих функции $U(w) = Z_{\gamma k}(u^{\text{ч}}(r, \varphi))$ и $\Psi(w) = Z_k(\psi^{\text{ч}}(r, \varphi))$ есть нечетные функции и наоборот. Поэтому исходная задача дифракции распадается на две противоположные по симметрии задачи: «четную», где функции $u_0^{\text{ч}}(r, \varphi)$, $\tilde{u}^{\text{ч}}(r, \varphi)$, $\tilde{\psi}^{\text{ч}}(r, \varphi)$ – четные функции по аргументу φ , и «нечетную», где $u_0^{\text{нч}}(r, \varphi)$, $\tilde{u}^{\text{нч}}(r, \varphi)$, $\tilde{\psi}^{\text{нч}}(r, \varphi)$ – нечетные функции по аргументу φ .

Окончательное решение исходной задачи дифракции определяется как среднее арифметическое решений «четной» и «нечетной» задач. Из свойств операторов $Z_{\gamma k}$ и Z_k имеем

$$u(r, \varphi) = u_0(r, \varphi) + \tilde{u}(r, \varphi).$$

Тогда

$$Z_{\gamma k}(u_0(r, \varphi) + \tilde{u}(r, \varphi)) = U_0(w) + \tilde{U}(w), \text{ т. е. } U(w) = U_0(w) + \tilde{U}(w);$$

$$Z_k(\tilde{\psi}(r, \varphi)) = \tilde{\Psi}(w), \text{ т. е. } \Psi(w) = \tilde{\Psi}(w).$$

При этом функции $U_0(w), \tilde{U}(w)$ одинаковой четности. Следовательно, решение исходной задачи дифракции определяется из системы равенств [2]:

$$\begin{aligned} u(r, \varphi) &= \frac{1}{2} \left[\left(u_0^{\text{ч}}(r, \varphi) + \tilde{u}^{\text{ч}}(r, \varphi) \right) + \left(u_0^{\text{нч}}(r, \varphi) + \tilde{u}^{\text{нч}}(r, \varphi) \right) \right] = \\ &= \frac{1}{2} \left[\left(u_0^{\text{ч}}(r, \varphi) + u_0^{\text{нч}}(r, \varphi) \right) + \left(\tilde{u}^{\text{ч}}(r, \varphi) + \tilde{u}^{\text{нч}}(r, \varphi) \right) \right] = u_0(r, \varphi) + \tilde{u}(r, \varphi). \end{aligned} \quad (18)$$

$$\psi(r, \varphi) = \frac{1}{2} \left(\tilde{\psi}^{\text{ч}}(r, \varphi) + \tilde{\psi}^{\text{нч}}(r, \varphi) \right) = \tilde{\psi}(r, \varphi), \quad (19)$$

$$u_0^{\text{ч}}(r, \varphi) = A \left(e^{i\gamma k r \cos(\varphi - \varphi_0)} + e^{i\gamma k r \cos(\varphi + \varphi_0)} \right),$$

$$u_0^{\text{нч}}(r, \varphi) = A \left(e^{i\gamma k r \cos(\varphi - \varphi_0)} - e^{i\gamma k r \cos(\varphi + \varphi_0)} \right).$$

При этом в «четном» случае, согласно (16), (17):

– если $U(-w) = -U(w)$, то $u^*(w, \varphi) = U(w + \varphi) + U(w - \varphi)$;

– если $\Psi(-w) = -\Psi(w)$, то $\Psi^*(w, \varphi) = \Psi(w + \pi - \varphi) + \Psi(w - \pi + \varphi)$. (20)

В «нечетном» случае, согласно (16), (17):

– если $U(-w) = U(w)$, то $u^*(w, \varphi) = U(w, +\varphi) - U(w - \varphi)$;

– если $\Psi(-w) = \Psi(w)$, то $\Psi^*(w, \varphi) = \Psi(w + \pi - \varphi) - \Psi(w - \pi + \varphi)$. (21)

Тогда, подставляя выражения (20), (21) в (14), (15), получим:

$$u^{\text{ч}}(r, \varphi) = u_0^{\text{ч}}(r, \varphi) + \tilde{u}^{\text{ч}}(r, \varphi) = \frac{1}{2\pi i} \int_c (U(w + \varphi) + U(w - \varphi)) e^{i\gamma k r \cos w} dw; \quad (22)$$

$$\psi^{\text{ч}}(r, \varphi) = \tilde{\psi}^{\text{ч}}(r, \varphi) = \frac{1}{2\pi i} \int_c (\Psi(w + \pi - \varphi) + \Psi(w - \pi + \varphi)) e^{i\gamma k r \cos w} dw; \quad (23)$$

$$u^{\text{нч}}(r, \varphi) = u_0^{\text{нч}}(r, \varphi) + \tilde{u}^{\text{нч}}(r, \varphi) = \frac{1}{2\pi i} \int_c (U(w + \varphi) - U(w - \varphi)) e^{i\gamma k r \cos w} dw; \quad (24)$$

$$\psi^{\text{нч}}(r, \varphi) = \tilde{\psi}^{\text{нч}}(r, \varphi) = \frac{1}{2\pi i} \int_c (\Psi(w + \pi - \varphi) - \Psi(w - \pi + \varphi)) e^{i\gamma k r \cos w} dw; \quad (25)$$

Функция $\tilde{U}(w)$ регулярна в полосе $|\operatorname{Re} w| \leq \Phi$; функция $U_0(w)$ имеет в полосе $|\operatorname{Re} w| < \Phi$ полюсы $\{\pm \varphi_0\}$ с заданными вычетами. Функция $\tilde{\Psi}(w)$ регулярна в полосе $|\operatorname{Re} w| \leq \pi - \Phi$. Представление функций $u(r, \varphi)$ и $\psi(r, \varphi)$ интегралом Зоммерфельда гарантирует асимптотику поля, достаточную для выполнения условия на ребре при $r \rightarrow 0$ [7].

Для того чтобы функции $u(r, \varphi), \psi(r, \varphi)$ в своих областях удовлетворяли условию излучения (на бесконечности), необходимо и достаточно, чтобы они в своих областях были представимы суммами вида:

$$u(r, \varphi) = u_0(r, \varphi) + \tilde{u}(r, \varphi) = u_0(r, \varphi) + u^{\text{геом}}(r, \varphi) + u^{\text{дифф}}(r, \varphi), \quad (26)$$

$$\psi(r, \varphi) = \tilde{\psi}(r, \varphi) = \psi^{\text{геом}}(r, \varphi) + \psi^{\text{дифф}}(r, \varphi),$$

слагаемые которых в дальней зоне (т. е. при $\gamma kr \gg 1$; $kr \gg 1$), соответственно в областях Γ_1 , Γ_2 , имели бы следующий вид:

$$u^{\text{геом}}(r, \varphi) = \sum_{n=1}^N C_n^q e^{i\gamma kr \cos(\varphi - \varphi_n^q)}, \quad \varphi_n^q \in [-\Phi, \Phi], \quad (27)$$

$$\psi^{\text{геом}}(r, \varphi) = \sum_{m=1}^M C_m^s e^{i\bar{\varphi} \cos(\bar{\varphi} - \varphi_m^s)}, \quad \varphi_m^s \in [\Phi, 2\pi - \Phi], \quad (28)$$

где N, M – натуральные числа, которые могут быть сколь угодно большими, $\bar{\varphi} = \pi - \varphi$ [7],

$$u^{\text{дифф}}(r, \varphi) = \frac{D_q(r)}{\sqrt{\gamma kr}} e^{-i(\gamma kr + \nu)} + O\left(\frac{1}{\sqrt{\gamma kr}}\right), \quad \varphi \neq \varphi_n^q, \quad (29)$$

$$\psi^{\text{дифф}}(r, \varphi) = \frac{D_s(r)}{\sqrt{kr}} e^{-i(kr + \nu)} + O\left(\frac{1}{\sqrt{kr}}\right), \quad \varphi \neq \varphi_m^s. \quad (30)$$

Здесь $u^{\text{геом}}(r, \varphi)$, $\psi^{\text{геом}}(r, \varphi)$ – геометрические дифракционные поля, сформированные отраженными, переотраженными и преломленными гранями клина в противоположную среду плоскими ЭМВ, распространяющимися соответственно в областях Γ_1 и Γ_2 по законам геометрической оптики. Направления распространения (линии разграничения областей «света» и «тени» для каждой плоской волны) определяются углами $\{\varphi_n^q\}_{n=1}^N$, $\{\varphi_m^s\}_{m=1}^M$ (рис. 3).

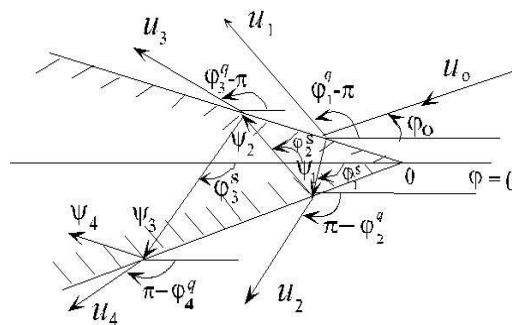


Рис. 3. Совокупность составляющих геометрического поля отраженных преломленных волн

Дифракционные поля $u^{\text{дифф}}(r, \varphi)$, $\psi^{\text{дифф}}(r, \varphi)$ определены электромагнитными волнами, рассеянными в пространство ребром клина соответственно в областях Γ_1 , Γ_2 ; $\{C_n^q\}_{n=1}^N$, $\{C_m^s\}_{m=1}^M$, $D_q(r)$, $D_s(r)$ – коэффициенты дифракции [6].

Дальнейшее развитие метода Зоммерфельда – Малюжинца связано с весьма важной функцией [3]

$$q(w, \gamma) = \arccos(\gamma \cos w), \quad (31)$$

где $\gamma = \frac{k_1}{k_2}$ – отношение волновых чисел областей Γ_1 , Γ_2 .

Функция задана на комплексной плоскости $C(\gamma)$ с разрезами по отрезку

$$I_n(\gamma) = [-\gamma_v + \pi n, \gamma_v + \pi n], \quad n \in Z, \quad \text{где}$$

$$\gamma_v = \begin{cases} \arccos \frac{1}{\gamma}, & \text{если } \gamma > 1; \\ i \operatorname{arch} \frac{1}{\gamma}, & \text{если } 0 < \gamma < 1. \end{cases} \quad (32)$$

Функция $g(w, \gamma)$ конформно отображает плоскость $C(\gamma)$ в плоскость $C\left(\frac{1}{\gamma}\right)$ с разрезами по отрезкам $I_n\left(\frac{1}{\gamma}\right) = [-\gamma^v + \pi n, \gamma^v + \pi n], n \in Z$, где

$$\gamma^v = \begin{cases} \arccos \gamma, & \text{если } 0 < \gamma < 1 \\ i \operatorname{arch} \gamma, & \text{если } \gamma > 1 \end{cases}. \quad (33)$$

Свойства функции $g(w, \gamma)$.

$$1. g(-w, \gamma) = -g(w, \gamma). \quad (34)$$

$$2. g(w, \gamma) = w + i \ln \gamma - i \frac{1 - \gamma^2}{\gamma^2} e^{2iw} + o\left(e^{-4|\operatorname{Im} w|}\right) \text{ при } \operatorname{Im} w \rightarrow \infty \text{ [4].}$$

Асимптотическое представление (34) функции $g(w, \gamma)$ обеспечивает предельный переход

$$\lim_{\gamma \rightarrow 1} g(w, \gamma) = w, \quad (35)$$

соответствующий случаю, когда $k_1 = k_2$, т. е. области Γ_1, Γ_2 совпадают по своим характеристикам проницаемости (клиновидная структура вырождается).

Обратная функция

$$g^{-1}(w, \gamma) = g\left(w, \frac{1}{\gamma}\right) = \arccos\left(\frac{1}{\gamma} \cos w\right) \quad (36)$$

осуществляет конформное отображение плоскости $C\left(\frac{1}{\gamma}\right)$ в $C(\gamma)$. Отображение $w \rightarrow g(w, \gamma)$

определяет переход из среды Γ_1 в среду Γ_2 ; обратное отображение $g^{-1}(w, \gamma) \rightarrow w$ соответствует переходу из Γ_2 в Γ_1 .

Выражение (31) можно преобразовать к виду

$$\frac{\cos g(w, \gamma)}{\cos w} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} - g(w, \gamma)\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - w\right)} = \gamma,$$

где последнее равенство есть реализация известного геометрикооптического закона Снеллиуса: $0,5\pi - w$ – угол падения, $0,5\pi - g(w, \gamma)$ – угол преломления в противоположную среду, γ – показатель преломления.

Введем операторы замены переменной:

$$L(\gamma)G(w) = G(g(w, \gamma)), L\left(\frac{1}{\gamma}\right)G(w) = G(g^{-1}(w, \gamma)), \quad (37)$$

$$L(\gamma)\left(e^{ikr \cos w} dw\right) = e^{ikr \cos g(w, \gamma)} dg(w, \gamma) = e^{i\gamma kr \cos w} g'(w, \gamma) dw.$$

При помощи функции $g(w, \gamma)$ осуществляется важное преобразование перехода из среды Γ_1 в среду Γ_2 :

$$e^{i\gamma kr \cos w} = e^{ikr \cos g(w, \gamma)}. \quad (38)$$

$$\text{Обозначим } a(w) = g'(w, \gamma) = \frac{\gamma \sin w}{\sqrt{1 - \gamma^2 \cos^2 w}}.$$

Подставляя пары (22), (23) и (24), (25) в граничные условия (10) и воспользовавшись преобразованиями (37), (38), получаем две системы функциональных уравнений:

$$U(w + \Phi) + U(w - \Phi) = a(w) [\Psi(g(w, \gamma) + (\pi - \Phi)) + \Psi(g(w, \gamma) - (\pi - \Phi))], \quad (39)$$

$$U(w + \Phi) - U(w - \Phi) = -\beta [\Psi(g(w, \gamma) + (\pi - \Phi)) - \Psi(g(w, \gamma) - (\pi - \Phi))] \quad (40)$$

для «четного» случая;

$$U(w + \Phi) - U(w - \Phi) = a(w) [\Psi(g(w, \gamma) + (\pi - \Phi)) - \Psi(g(w, \gamma) - (\pi - \Phi))], \quad (41)$$

$$U(w + \Phi) + U(w - \Phi) = -\beta [\Psi(g(w, \gamma) + (\pi - \Phi)) + \Psi(g(w, \gamma) - (\pi - \Phi))] \quad (42)$$

для «нечетного» случая [7].

Таким образом, исходная дифракционная граничная задача сведена к системам (39)–(42) функциональных уравнений относительно аналитических функций $U(w)$, $\Psi(w)$. Подставляя найденные из данных систем функции $U(w)$, $\Psi(w)$ в интегралы (22)–(25) можно найти решения $u(r, \varphi)$ и $\psi(r, \varphi)$ исходной дифракционной задачи – дифракцию плоских ЭМВ на радиопрозрачном (диэлектрическом) клине. Решения определяют все составляющие поля дифракции в соответствии с выражениями (27)–(30).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная методика служит основой для аналитического расчета систем радиопоглощающих экранов сотовой структуры с диэлектрическими периодическими клиновидными образованиями в их вертикальных сечениях с использованием современных пакетов моделирования. Она может служить как для создания моделей электродинамического расчета при исследовании процессов дифракции ЭМВ на реальных объектах радиолокации, так и для верификации имеющихся моделей, в том числе в части оценки характеристик проективных радиопоглощающих структур.

Указанные радиопоглощающие сотовые структуры имеют по сравнению с другими их типами ряд существенных преимуществ, которые заключаются в следующем:

- возможности минимизации эффективной площади рассеяния периодической клиновидной структуры за счет формирования (путем подбора геометрических и радиофизических параметров) оптимального геометрического поля отраженных и преломленных гранями плоских волн;
- незначительной напряженности поля дифракции на ребре падающей плоской волны в направлении на источник локации (за исключением весьма незначительного сектора изменения полярного угла падающей ЭМВ);
- наличии эффекта полного внутреннего отражения плоских волн внутри диэлектрического клина (призмы);
- возможности введения потерь в диэлектрике, приводящих к быстрому затуханию волн;

- построении периодической клиновидной структуры на поглощающей подложке, препятствующей возникновению обратного хода лучей внутри диэлектрической клиновидной структуры;
- отсутствии поверхностных волн, возбуждаемых ребром на гранях диэлектрического клина;
- в высоком уровне рассеяния волн с сотовой клиновидной структурой.

Разработанные на основании электродинамического принципа взаимности методы расчета характеристик направленности источников различной поляризации, помещенных внутри или в окрестности диэлектрического клина, также могут быть положены в основу принципов построения новых типов антенн, в том числе антенн со специальной формой диаграммы направленности.

Список используемых источников

1. *Малюжинец Г.Д.* Интегралы Зоммерфельда и их приложение. – Д.: ЛЦНИИ «Румб», 1981. – 31 с.
2. *Бобровников М.С., Фисанов В.В.* Дифракция волн в угловых областях. – Томск, 1988. – 430 с.
3. *Завадский В.Ю.* Вычисление волновых полей в открытых областях и волноводах. – М.: Наука, 1972. – 558 с.
4. *Будаев Б.В.* Дифракция упругих волн на свободном клине // ЛОМИ препринт Е-2-90. – Л., 1990.
5. *Лихачев В.М., Сташкевич А.И.* Метод Зоммерфельда – Малюжинца в задачах дифракции электромагнитных волн на клиновидных структурах (единый подход) // Радиотехника РАН. – 1999. – №8. – С. 62–65.
6. *Лихачев В.М., Крячко А.Ф., Сташкевич А.И.* Теория дифракции электромагнитных волн на клиновидных структурах и ее приложения к проблемам радиолокации и радиосвязи // Труды XVI–XIX Всероссийских симпозиумов «Радиолокационное исследование природных сред». – СПб.: ВИКУ им. А.Ф. Можайского, 2002. – Вып. 2. – С. 200–208.
7. Теория рассеяния электромагнитных волн в угловых структурах / А.Ф. Крячко, В.М. Лихачев, С.Н. Смирнов, А.И. Сташкевич. – СПб.: Наука, 2009. – 194 с.

Д.И. Бучинский;
А.В. Паршуткин,
доктор техн. наук, профессор

МОДЕЛЬ ВОЗДЕЙСТВИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПОМЕХ НА КАДРОВУЮ СИНХРОНИЗАЦИЮ СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ СВЯЗИ

Статья посвящена вопросам моделирования воздействия непреднамеренных нестационарных помех на кадровую синхронизацию в современных протоколах широкополосной передачи данных спутниковых систем связи. Представлено описание модели воздействия нестационарной согласованной по частоте и ширине спектра помехи на подсистему кадровой синхронизации приемников спутниковых систем связи.

Ключевые слова: кадровая синхронизация, протокол передачи данных, адаптивные протоколы, помехоустойчивость, спутниковые системы связи, нестационарная помеха.

ВВЕДЕНИЕ

В ответ на возрастающие потребности современного общества в широкополосных системах спутниковой связи происходит активное освоение новых диапазонов частот, таких как Ku и Ka. В данных диапазонах условия распространения радиоволн существенно зависят от различных быстроменяющихся факторов, главным образом от метеоусловий. Поэтому в современных системах спутниковой связи (ССС) широкое применение находят адаптивные протоколы передачи данных, повышение пропускной способности в которых достигается за счет адаптации к условиям распространения радиоволн в канале передачи информации. Суть адаптации сводится к управлению видами модуляции и кодирования в соответствии с существующими в данный момент условиями распространения и помеховой обстановкой [1]. При этом реализация механизмов адаптации тесно связана с кадровой синхронизацией. Поскольку на приемной стороне заранее не может быть известно, какая выбрана схема кодирования и вид модуляции, а информация об этом располагается в строго установленном месте кадра канального уровня, то правильное определение границ кадра оказывает решающее влияние на возможность дальнейшей обработки сигнала и правильный прием передаваемой информации [2]. Однако активное освоение указанных диапазонов частот обуславливает высокую загруженность электромагнитного спектра, а значит, опасность возникновения различных непреднамеренных нестационарных помех. Таким образом, можно утверждать, что исследования воздействия различных непреднамеренных видов помех на системы синхронизации приемников современных ССС в интересах обеспечения их электромагнитной совместимости являются актуальными [3, 4], в том числе непреднамеренных нестационарных помех, попадающих в полосу полезного сигнала.

Целью работы является исследование влияния непреднамеренных нестационарных помех на подсистему кадровой синхронизации приемника широкополосной ССС.

МОДЕЛЬ ВОЗДЕЙСТВИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПОМЕХ НА КАДРОВУЮ СИНХРОНИЗАЦИЮ ПРИЕМНИКА СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ СВЯЗИ

Устройство подсистемы кадровой синхронизации рассмотрим на примере семейства адаптивных протоколов *DVB-S2/DVB-RCS*. Данные протоколы предусматривают наличие в приемнике подсистемы символьной синхронизации и подсистемы кадровой синхронизации [5].

Подсистема символьной синхронизации основана на алгоритме Гарднера, который позволяет выбрать оптимальный момент дискретизации. После того, как будут известны оптимальные моменты дискретизации, каждый символ представляют одним отсчетом. Это позволяет существенно упростить дальнейшую обработку.

После символьной синхронизации производится кадровая синхронизация, которая реализуется посредством детектирования синхропоследовательности в принимаемом сигнале. Обнаружение осуществляется дифференциальным детектором, который по сути представляет собой коррелятор с детектором пиков.

Таким образом, модель воздействия нестационарных помех на систему синхронизации ССС должна включать модель передатчика, формирующего кадры на канальном уровне, модель помехи, модель среды распространения [6] и модель приемника ССС. Структурная схема предлагаемой модели представлена на рис. 1. Моделируется случай использования квадратурной фазовой манипуляции (*QPSK – Quadrature Phase Shift Keying*).

Для исследования кадровой синхронизации необходимо, чтобы модель обладала достаточным быстродействием для формирования и обработки большого количества канальных кадров. Поэтому для реализации модели была выбрана программная платформа *GNURadio*, использующая сочетание компилируемого языка программирования *C++*, обеспечивающего высокое быстродействие разрабатываемой модели, и интерпретируемого языка программирования *Python*, обеспечивающего высокую скорость разработки.

Модель передатчика ССС включает формирователь заголовка кадра канального уровня, который формирует псевдослучайную последовательность длиной 64 бита, используемую для синхронизации. Эта синхропоследовательность составляет 6,25% от длительности всего кадра.

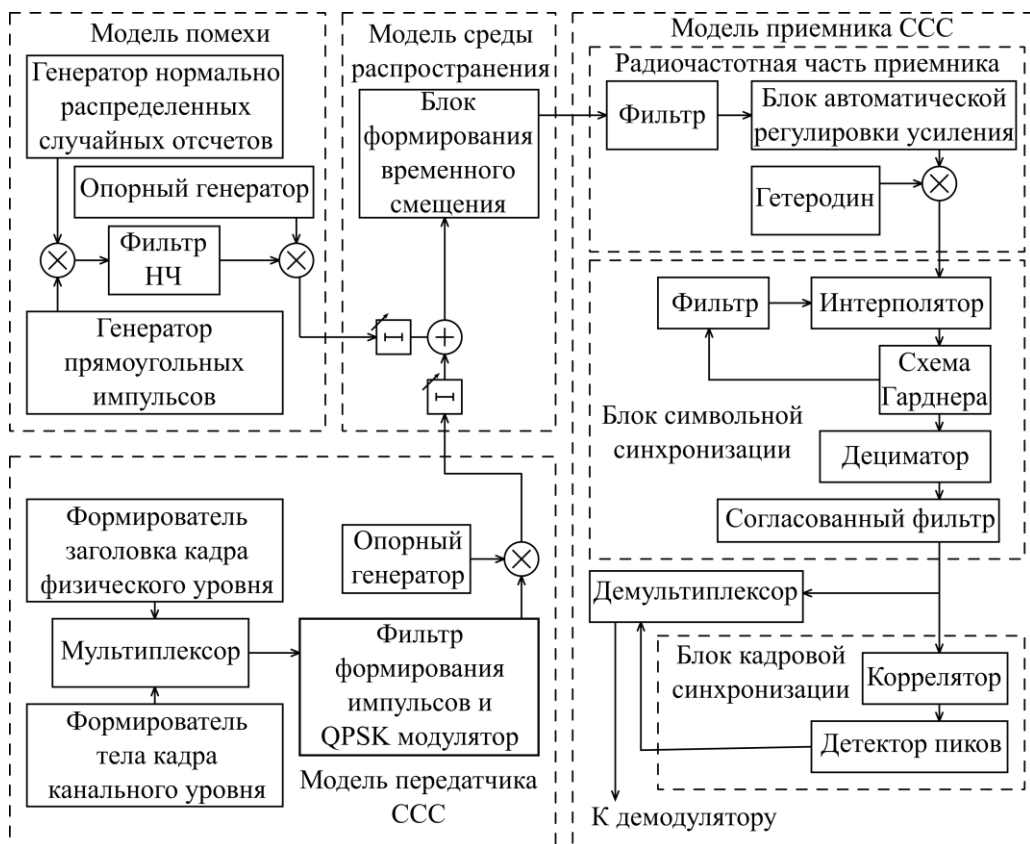


Рис. 1. Структурная схема модели воздействия нестационарных помех на систему синхронизации ССС

В формирователе тела кадра канального уровня осуществляется генерация скремблированного сообщения, которое представляет собой случайную последовательность с равными вероятностями появления 0 и 1. После чего псевдослучайная последовательность и скремблированное сообщение поступают в мультиплексор, где из них формируется кадр канального уровня. Кадр разбивается на символы по 2 бита, затем каждому символу с помощью таблицы поиска сопоставляется комплексное число. Реальная часть полученного комплексного числа представляет собой синфазную составляющую сигнала, а мнимая – квадратурную. Полученный сигнал подвергается повышающей передискретизации с добавлением нулевых отсчетов. Далее производится формирование модулирующих импульсов путем фильтрации сигнала фильтром с амплитудно-частотной характеристикой вида корень из приподнятого косинуса (*Root raised-cosine*). Синфазная и квадратурная составляющие умножаются на гармонические колебания, сдвинутые по фазе, и складываются. Модель полученного сигнала может быть представлена формулой

$$s[n] = \cos(2\pi f_n n\tau) \sum_{i=0}^N b_i I[n-i] - \sin(2\pi f_n n\tau) \sum_{i=0}^N b_i Q[n-i], \quad (1)$$

где n – текущий отсчет;
 $I[n]$ – отсчет сигнала синфазной составляющей;
 $Q[n]$ – отсчет сигнала квадратурной составляющей;
 f_n – промежуточная частота;
 τ – период дискретизации;
 N – порядок фильтра;
 b_i – i -й коэффициент фильтра нижних частот.

С помощью опорного генератора полученный сигнал переносится на радиочастоту. Параллельно модель помехи формирует помехи путем умножения случайных независимых нормально распределенных отсчетов на прямоугольные импульсы определенного периода и скважности. Таким образом, на выходе умножителя получаются импульсы шума, спектр которого ограничен частотой дискретизации. Для того чтобы согласовать спектр помехи со спектром полезного сигнала, полученные помеховые импульсы подаются на фильтр нижних частот. Модель такой помехи может быть представлена формулой [7]

$$\chi[n] = a[n] \sum_{i=0}^N b_i \xi[n-i], \quad (2)$$

где $a[n]$ – отсчет, формируемый генератором прямоугольных импульсов в отсчет n ;
 N – порядок фильтра;
 $\xi[n-i]$ – некоррелированные нормально распределенные величины с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ^2 .

Будем полагать, что спектральная плотность мощности помехи на выходе генератора случайных отсчетов в первом приближении постоянна и равна σ^2/f_d . Тогда средняя мощность помехи может быть оценена по формуле

$$\bar{P}_n = D \frac{\sigma^2}{f_d} \int_0^{f_d} S_{\text{ФНЧ}}^2(f) df, \quad (3)$$

где σ – среднеквадратическое отклонение нормально распределенных случайных отсчетов, формируемых генератором;
 f_d – частота дискретизации при формировании помехи;
 $S_{\text{ФНЧ}}(f)$ – амплитудно-частотная характеристика фильтра нижних частот;
 D – коэффициент заполнения генератора прямоугольных импульсов.

Полученный помеховый сигнал переносится опорным генератором на частоту сигнала, после чего аддитивная смесь сигнала и помехи поступает в модель среды распространения, где с помощью управляемых линий задержки моделируется различное запаздывание помехи относительно полезного сигнала. Блок формирования временного смещения добавляет неко-

торое временное смещение для симуляции несовпадения частоты дискретизации приемника и передатчика.

Затем смесь сигнала и помехи поступает в модель радиочастотной части приемника, где главным элементом является блок автоматической регулировки усиления. Он необходим прежде всего для корректной работы подсистемы символьной синхронизации, поскольку сигнал ошибки в алгоритме Гарднера зависит от амплитуды входного сигнала. В блоке символьной синхронизации производится интерполяция поступающего сигнала с помощью полифазного банка фильтров и вычисление по полученным отсчетам сигнала ошибки дискретизации. Сигнал ошибки, пропущенный через фильтр второго порядка, определяет номер фильтра из полифазного банка фильтров, сигнал с выхода которого будет использоваться для дальнейшей обработки. После этого сигнал поступает на согласованный фильтр, отклик которого на выходе блока символьной синхронизации подвергается децимации, т. е. понижению частоты дискретизации, с тем, чтобы сигнал был представлен одним отсчетом на символ. Данный сигнал поступает на демультимплексор и блок кадровой синхронизации, состоящий из коррелятора и детектора пиков. Когда сигнал на выходе коррелятора превышает заданный порог, детектор пиков формирует кадровый синхроимпульс, с помощью которого производится демультимплексирование заголовка канального кадра и тела сообщения.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ НЕПРЕДНАМЕРЕННЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ШУМОВЫХ ПОМЕХ НА ПОДСИСТЕМУ КАДРОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ

Моделировалась ситуация воздействия нестационарной согласованной по частоте, ширине спектра и периоду помехи в виде последовательности периодических шумоподобных импульсов. При этом для случая совпадения начала импульса непреднамеренной помехи и синхропоследовательности рассчитывались две зависимости.

Первая – зависимость отношения мгновенной мощности помехи P_n к мощности сигнала P_c при фиксированной вероятности пропуска синхрогруппы от коэффициента заполнения помеховых импульсов. Эта зависимость представлена на рис. 2.

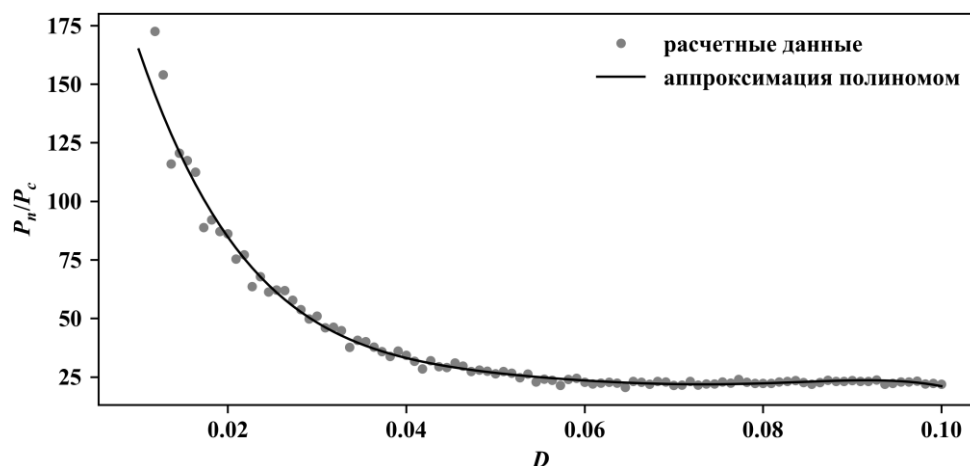


Рис. 2. Зависимость отношения мгновенной мощности помехи к мощности сигнала при фиксированной вероятности пропуска синхропоследовательности от коэффициента заполнения помехового импульса

Вторая – зависимость защитного отношения γ от коэффициента заполнения помеховых импульсов, представленная на рис. 3. Защитное отношение ввиду многократного превышения мощности помехи над уровнем шума рассчитывалось по формуле [8]

$$\gamma = \left(\frac{P_c}{P_n} \right) \Big|_{P_0=10^{-2}}, \quad (4)$$

где $\overline{P_n}$ – средняя мощность помехи;

P_0 – вероятность пропуска синхропоследовательности.

Для случая, когда начало помехового импульса не совпадало с началом синхрогруппы, были получены зависимости защитного отношения от отношения времени задержки помехового импульса относительно начала синхрогруппы τ_3 к периоду следования синхрогрупп T_c .

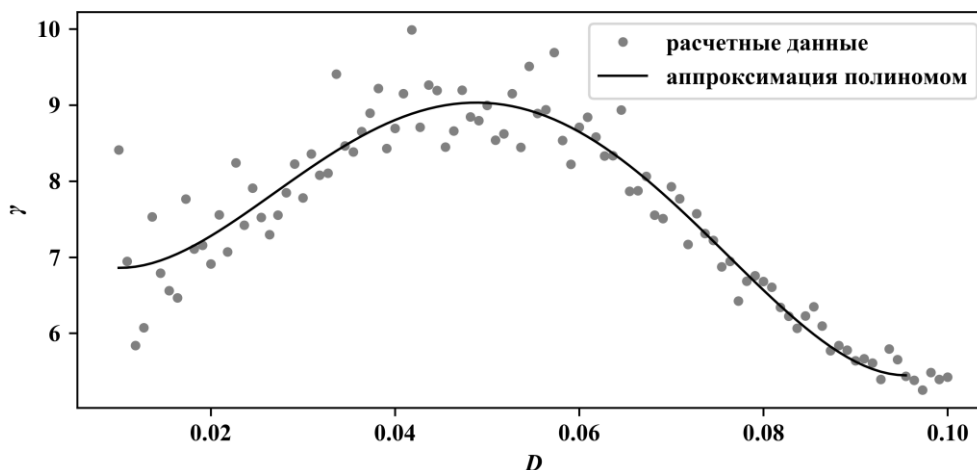


Рис. 3. Зависимость защитного коэффициента от коэффициента заполнения помехового импульса

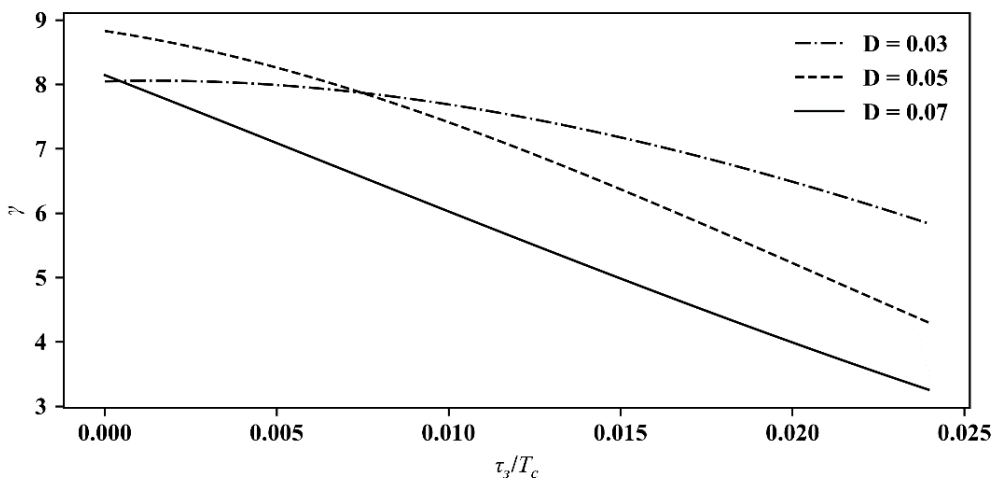


Рис. 4. Зависимость защитного коэффициента от времени задержки импульса помехи относительно синхропоследовательности, отнесенного к периоду следования синхрогрупп

На рис. 4 представлены кривые полученных зависимостей для различных коэффициентов заполнения помехового импульса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные зависимости позволяют сделать вывод, что наибольшую опасность для системы синхронизации представляют импульсные помехи, длительность которых меньше длительности синхропоследовательности на 10–15%. Это объясняется явлением нелинейных искажений в блоке автоматической регулировки сигнала при скачкообразном изменении мощности сигнала. Кроме того, поскольку длительность таких помех меньше синхропоследовательности, то защитное отношение в этом случае в меньшей степени зависит от времени задержки импульса помехи относительно синхропоследовательности.

Проведенные исследования показали, что традиционный подход к оценке парной и групповой электромагнитной совместимости, ориентированный на оценку средней мощности помехи, не учитывает особенностей, возникающих при воздействии нестационарных помех. Для корректного учета влияния нестационарных помех на электромагнитную совместимость приемников ССС следует учитывать выявленные особенности функционирования систем кадровой синхронизации, так как нарушение связи может возникать за счет срыва синхронизации.

Список используемых источников

1. ETSI TR 102 376-1: " Digital Video Broadcasting (DVB); User guidelines for the second generation system for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications (DVB-S2)". – URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/102300_102399/10237601/01.02.01_60/tr_10237601v010201p.pdf (дата обращения: 15.03.2019).

2. Луценко С.А. Подход к расчету энергетического выигрыша при постановке помех системе цикловой синхронизации спутниковых линий связи // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. – 2019. – № 3. – URL: <http://jre.cplire.ru/jre/mar19/14/text.pdf> (дата обращения: 21.03.2019).

3. Маслаков П.А., Паршуткин А.В. Исследование помехоустойчивости современных стандартов спутниковой связи к воздействию нестационарных помех // Труды СПИИРАН. – 2017. – № 4 (53) – С. 159–177.

4. Агиевич С.Н., Луценко С.А., Тихонов С.С. Моделирование сигналов спутниковых систем радиосвязи и ретрансляции данных с применением методов сплайн-алгебраического гармонического анализа // Телекоммуникации. – 2019. – № 1. – С. 16–22.

5. ETSI TR 102 376-1: " Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for the second generation system for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part 1: DVB-S2". – URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/102300_102399/102376/01.01.01_60/tr_102376v010101p.pdf (дата обращения: 15.03.2019).

6. Маслаков П.А., Паршуткин А.В., Фомин А.В. Модель функционирования канала спутниковой связи при воздействии нестационарных помех // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. – Вып. 651. – С. 78–83.

7. Сергиенко А.А. Цифровая обработка сигналов. – СПб.: Питер, 2006. – 751 с.

8. Маслаков П.А., Фомин А.В., Богаченков К.Н. Алгоритм оценивания помехоустойчивости канала спутниковой связи стандарта DVB-S2 при воздействии нестационарных помех // Сборник алгоритмов и программ прикладных задач / под ред. О.М. Степанюка. – 2016. – Вып. 33. – С. 230–235.

Д.И. Бучинский;
 В.В. Вознюк,
 кандидат техн. наук, доцент;
 А.В. Фомин,
 кандидат техн. наук

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ПРИЕМНИКА СИГНАЛОВ С МНОГОПОЗИЦИОННОЙ ФАЗОВОЙ МАНИПУЛЯЦИЕЙ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ПОМЕХ С РАЗЛИЧНОЙ СТРУКТУРОЙ

Приведены результаты исследований, выполненных на основе разработанной авторами модели воздействия непреднамеренной шумовой помехи с переменными значениями несущей частоты и ширины спектра на цифровой канал передачи информации с многопозиционной фазовой манипуляцией. Оценивается помехоустойчивость приемника сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией на основе определения взаимосвязанных вероятностей битовой и символьной ошибок. При этом устойчивое функционирование радиолинии фиксируется по итогам обработки экспериментальных данных при различных параметрах помехи для вероятности символьной ошибки не более 0,01.

Ключевые слова: помехоустойчивость, многопозиционная фазовая манипуляция, помеха.

ВВЕДЕНИЕ

Известно достаточное количество публикаций, посвященных исследованиям помехоустойчивости приемников сигналов с различными видами модуляции [1, 4–9], в том числе с многопозиционной фазовой манипуляцией (М-ФМн). Однако в большинстве работ в качестве помехи рассматривается белый гауссовский шум (БГШ) с постоянной спектральной плотностью средней мощности. В то же время в реальных ситуациях структура непреднамеренных помех может существенно отличаться от БГШ, например, узкополосные помехи способны воздействовать не на весь спектр сигнала, а лишь на отдельные его составляющие и при этом существенно превосходить их по интенсивности. Таким образом, задача оценки помехоустойчивости приемника сигналов с М-Фм в условиях воздействия непреднамеренной узкополосной шумовой помехи с различной структурой является актуальной.

Статистическое описание процесса воздействия непреднамеренных шумовых помех различной структуры на приемник сигналов с М-Фм является сложной задачей, поэтому решать ее предлагается на основе имитационного моделирования. Для этого в среде моделирования MATLAB разработана компьютерная модель процесса воздействия помех на приемник сигналов с М-Фмн. На рис. 1 представлена структурная схема разработанной модели.

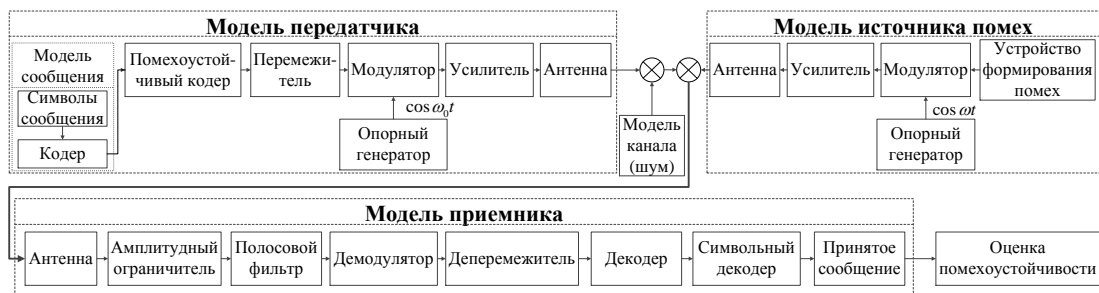
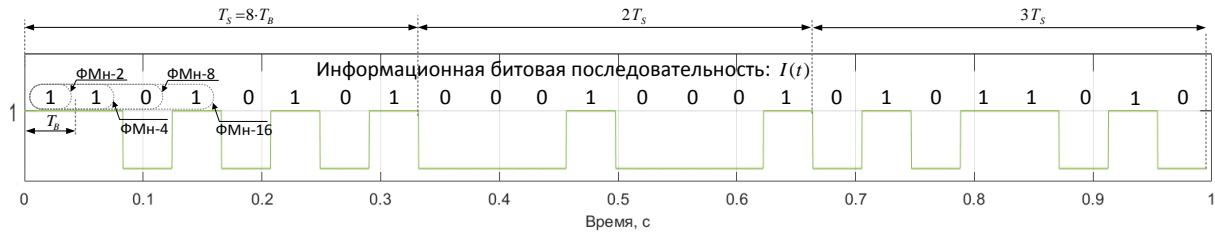


Рис. 1. Структурная схема модели воздействия помех на приемник сигналов с М-ФМн

В состав модели входят ряд подмоделей: передатчика, приемника, источника помех, канала передачи информации. Опишем их более подробно.

МОДЕЛЬ ПЕРЕДАТЧИКА

Задачей передатчика является формирование высокочастотного сигнала, модулированного информационным сообщением. В работе информационное сообщение представляется в виде набора символов ASCII-кода (1 символ – 8 бит):



Сформированная последовательность битов подается на вход помехоустойчивого кодера. Модель позволяет использовать различные виды помехоустойчивых кодов. В качестве примера, при получении экспериментальных данных, используется кодер Боуза – Чоудхури – Хоквингема (15,7). Такой кодер способен исправлять до двух ошибок. Для исключения групповых (сосредоточенных) ошибок расширенная последовательность битов подвергается перемежению и далее подается на вход M-PSK модулятора, где несущее колебание манипулируется по фазе (M – порядок манипуляции). Фазоманипулированный сигнал имеет следующий вид:

$$S(t) = U_0 \cos(\omega_0 t + \theta_i(t) + \theta_0), \text{ где } \theta_i(t) = i \cdot \frac{2\pi}{M}, \quad i = \overline{1, M}.$$

Для $M=2$ (ФМн-2):	Для $M=8$ (ФМн-8):	Для $M=16$ (ФМн-16):
$\theta_i(t) = \left(\frac{\pi}{4}, I(t)=0 \right); \left(0, I(t)=1 \right)$	$\left(\frac{\pi}{4}, I(t)=000 \right); \left(\frac{\pi}{2}, I(t)=001 \right); \left(\frac{3\pi}{4}, I(t)=010 \right); \left(\pi, I(t)=011 \right); \left(\frac{5\pi}{4}, I(t)=100 \right); \left(\frac{3\pi}{2}, I(t)=101 \right); \left(\frac{7\pi}{4}, I(t)=110 \right); \left(2\pi, I(t)=111 \right)$	$\left(\frac{\pi}{8}, I(t)=0000 \right); \left(\frac{\pi}{4}, I(t)=0001 \right); \left(\frac{3\pi}{8}, I(t)=0010 \right); \left(\frac{\pi}{2}, I(t)=0011 \right); \left(\frac{5\pi}{8}, I(t)=0100 \right); \left(\frac{3\pi}{4}, I(t)=0101 \right); \left(\frac{7\pi}{8}, I(t)=0110 \right); \left(\pi, I(t)=0111 \right); \left(\frac{9\pi}{8}, I(t)=1000 \right); \left(\frac{5\pi}{4}, I(t)=1001 \right); \left(\frac{11\pi}{8}, I(t)=1010 \right); \left(\frac{3\pi}{2}, I(t)=1011 \right); \left(\frac{13\pi}{8}, I(t)=1100 \right); \left(\frac{7\pi}{4}, I(t)=1101 \right); \left(\frac{15\pi}{8}, I(t)=1110 \right); \left(2\pi, I(t)=1111 \right)$
Для $M=4$ (ФМн-4):		
$\theta_i(t) = \left(\frac{\pi}{2}, I(t)=00 \right); \left(\pi, I(t)=01 \right); \left(\frac{3\pi}{2}, I(t)=10 \right); \left(2\pi, I(t)=11 \right)$		

В формуле, определяющей фазоманипулированный сигнал, введены следующие обозначения: U_0 – амплитуда; ω_0 – несущая частота; $\theta_i(t)$ – информационная фаза, может принимать M дискретных значений, θ_0 – начальная фаза; $I(t)$ – информационный сигнал.

В ходе моделирования скорость передачи информации ($R = 1/\tau_{и}$) считается фиксированной величиной для различных M .

На рис. 2 показаны спектры сигналов ФМн-2,4,8,16 при фиксированной скорости передачи информации, из рисунка видно, что при увеличении M ширина спектра сигнала уменьшается.

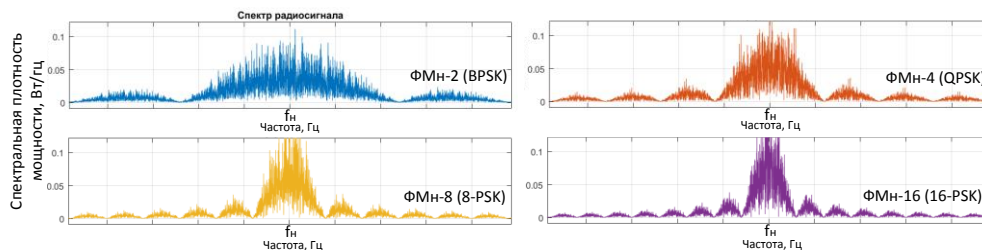


Рис. 2. Спектры сигналов ФМн-2,4,8,16 при фиксированной скорости передачи информации

МОДЕЛЬ КАНАЛА

В качестве модели канала (шума) используется случайный процесс, мгновенные значения которого распределены по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и с заданным значением дисперсии. Математическая модель шума описывается выражением [2]

$$\xi[n] = \sum_{k=1}^{N_u} E_k \cos\left(\frac{k\pi n}{N} + \alpha_k\right)$$

где E_k – случайный коэффициент с релеевским распределением $\left(w(E) = \frac{E}{\sigma^2} \cdot e^{-\frac{E^2}{2\sigma^2}}, E \geq 0, \sigma = \sqrt{P_{\text{ш}}}\right)$;

α_k – случайные фазы гармоник, независимые от E_k и распределенные равномерно в интервале $[0, 2\pi]$.

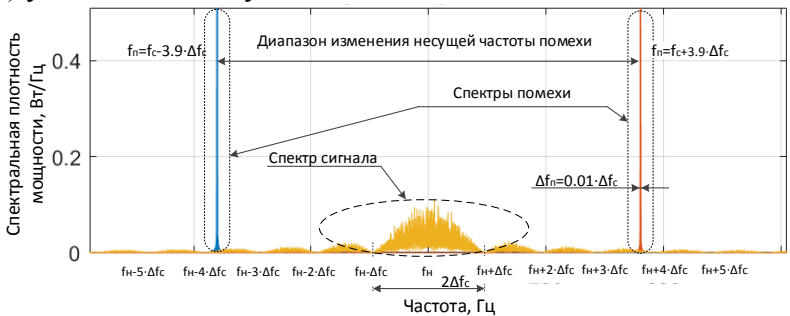
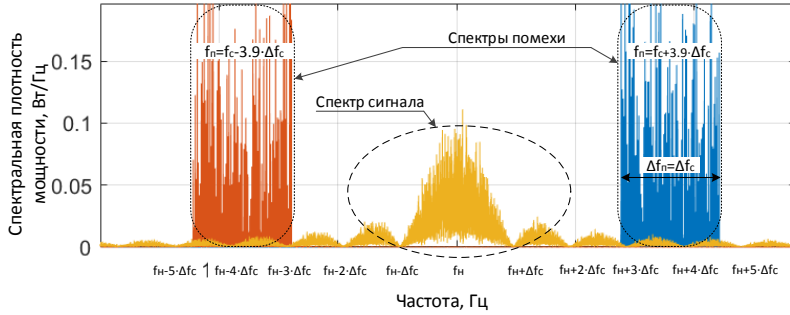
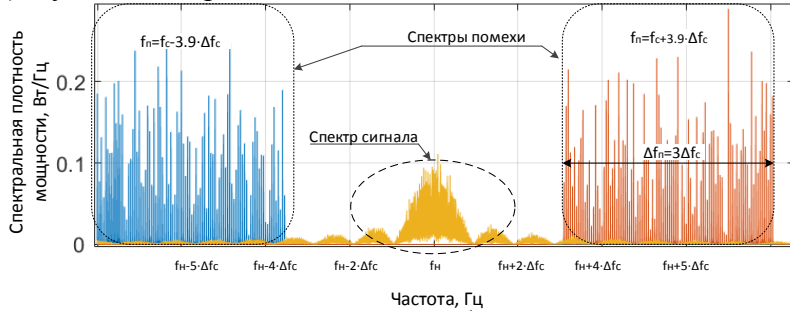
При проведении исследований средняя мощность шума считалась фиксированной величиной.

МОДЕЛЬ ИСТОЧНИКА ПОМЕХ

На выходе источника помех формируется помеховое воздействие с требуемой временной и спектральной структурой. В работе рассматривается шумовая помеха с переменными значениями несущей частоты и ширины спектра. Математическая модель, а также спектральные характеристики помехи представлены в табл. 1.

Таблица 1

Спектральные характеристики помехи

Математическая модель шумовой помехи:	Спектры шумовых помех с различными значениями несущей частоты и ширины спектра:
$\xi[n] = \sum_{k=1}^N E_k \cos\left((\omega_1 + (\omega_2 - \omega_1) \frac{kn}{N}) + \alpha_k\right),$	<p>а) узкополосная шумовая</p>  <p>б) шумовая, прицельная по полосе частот</p>  <p>в) шумовая, заградительная по полосе частот</p> 
<p>где E_k – случайный коэффициент с релеевским распределением, у которого параметр $\sigma = \sqrt{P_{\text{ш}}}$;</p>	
<p>ω_1 – нижняя частота спектра помехи;</p>	
<p>ω_2 – верхняя частота спектра помехи;</p>	
<p>α_k – случайные фазы гармоник, независимые от E_k и распределенные равномерно в интервале $[0, 2\pi]$.</p>	

МОДЕЛЬ ПРИЕМНИКА

Для исключения влияния мощных помех, переводящих приемник в нелинейный режим работы, а также для обеспечения заданного динамического диапазона входного сигнала в модель приемника включен амплитудный ограничитель (рис. 3).

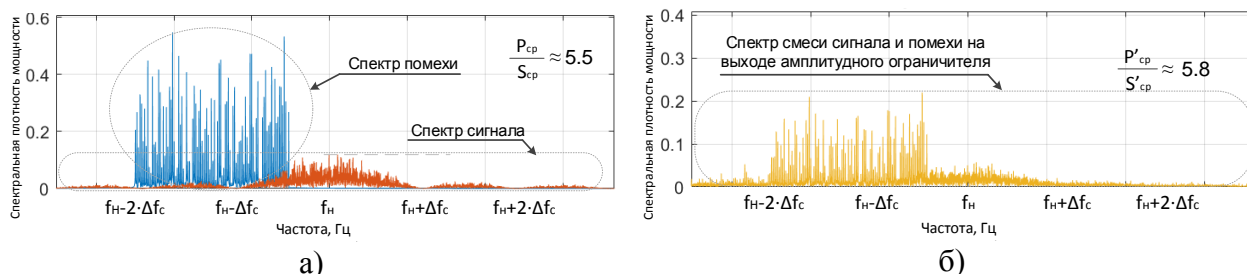


Рис. 3. Спектры сигнала и помехи до амплитудного ограничителя (а) и после него (б)

Выделение необходимой полосы частот обеспечивается полосовым фильтром, который реализован на основе фильтра Баттерворта 6-го порядка. Далее сигнал поступает на квадратурный демодулятор, в котором происходит выделение синфазной и квадратурной составляющих, а затем – их фильтрация с помощью интегратора. После этого осуществляется детектирование сигнала – процесс проверки каждого отсчета отфильтрованного сигнала и определения, какому переданному символу он вероятнее всего соответствует (в модели реализовано «жесткое» детектирование). Представленные на рис. 4 сигнальные созвездия показывают, что при увеличении порядка манипуляции и фиксированной скорости передачи информации, за счет увеличения интервала накопления, энергия принятого бита возрастает.

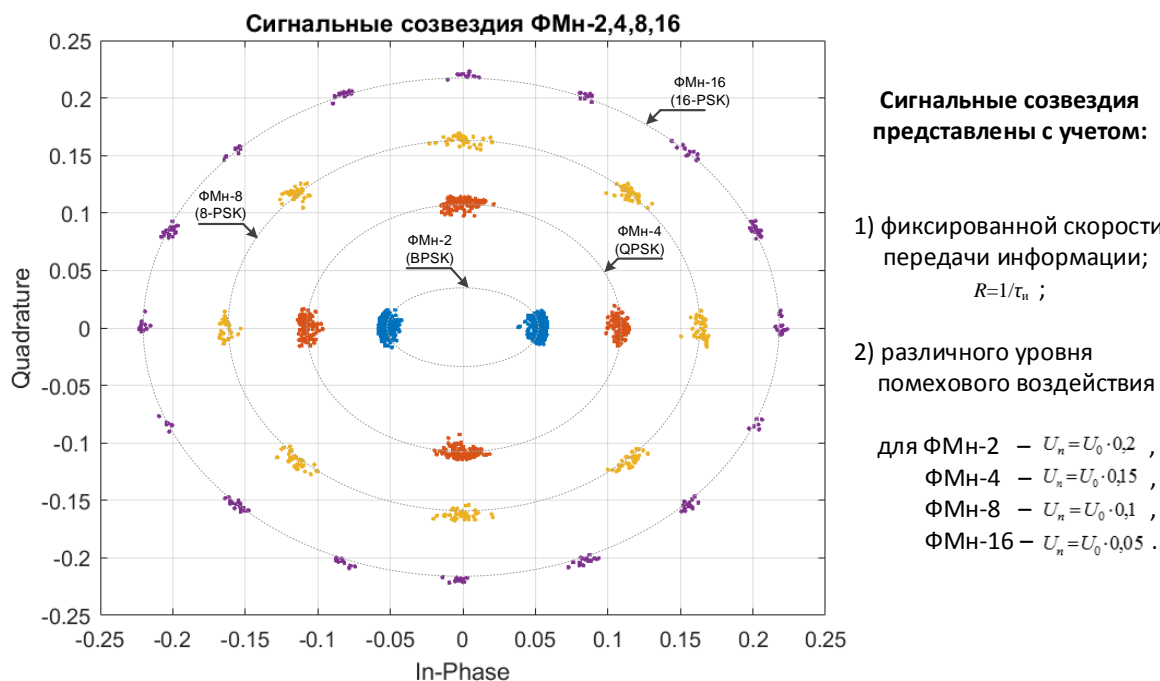


Рис. 4. Сигнальные созвездия при приеме сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией

После того как символ определен, составляется последовательность канальных битов. Затем осуществляются канальное декодирование и дегерережевание, результатом которого является принятая последовательность информационных битов. Полученная битовая последо-

вательность поступает на вход символьного декодера, где происходит восстановление переданного сообщения в буквосимвольном виде.

ОЦЕНКА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ПРИЕМНИКА С М-ФМН

На практике наиболее часто применяемым показателем результативности радиоэлектронной защиты радиоэлектронных средств (РЭС) выступает защитное отношение [3], определяемое как минимальное отношение мощности сигнала к мощности помехи и шумов на входе приемника РЭС, при котором еще обеспечивается требуемое качество функционирования РЭС:

$$\gamma_3 = \left(\frac{P_c}{P_n + P_{ш}} \right)_{\min}$$

Как критерий, определяющий требуемое качество функционирования цифровой радиосвязи, будет использоваться вероятность символьной ошибки – отношение количества искаженных символов (букв) к общему числу символов передаваемого сообщения: $p = N_{\text{иск}} / N_{\text{общ}}$. При этом устойчивым функционированием канала связи в условиях действия помех принято состояние, когда искажается не более одного символа на 100 принятых ($p^* = 0,01$). Рассчитанное значение защитного отношения для заданной пороговой вероятности символьной ошибки p^* показывает допустимый уровень помехи, при котором радиосвязь продолжает устойчиво функционировать.

Защитное отношение зависит от структуры сигнала и помехи. В нашем случае структура сигнала фиксирована. Структура помехи изменялась по следующим параметрам: частоте помехи f_n и ширине спектра шумовой помехи Δf_n .

Расчет защитного отношения γ_3 производится при достижении вероятности символьной ошибки $p^* = 0,01$. На рис. 5 представлены зависимости вероятностей битовой информационной и символьной ошибок от отношения P_c / P_n для согласованной по частоте несущей и ширине спектра шумовой помехи ($\Delta f_c = \Delta f_n$, $f_c = f_n$). Анализ этих графиков показал следующее:

- реальная помехоустойчивость приемника сигналов с модуляцией ФМн-2 (BPSK) и ФМн-4 (QPSK) примерно одинаковая (разница в 0,7–0,8 дБ), при условии постоянства скорости передачи информации;
- реальная помехоустойчивость сигналов с модуляцией ФМн-8 (8-PSK) и ФМн-16 (16-PSK) оказывается существенно ниже (на 5 дБ и на 8,3 дБ соответственно).

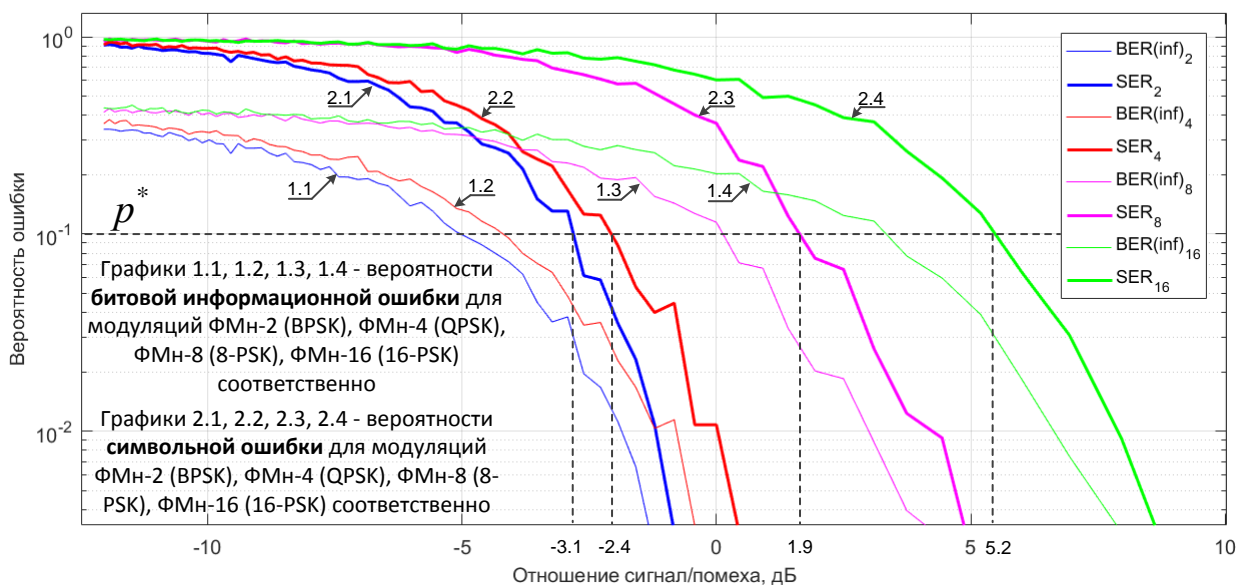


Рис. 5. Графики зависимостей вероятностей битовой (информационной) и символьной ошибок от отношения сигнал/помеха

На рис. 6 представлены зависимости вероятностей битовой информационной и битовой канальной ошибок от отношения P_c/P_n для узкополосной шумовой помехи, характеризующие битовые ошибки на выходе декодера и демодулятора соответственно.

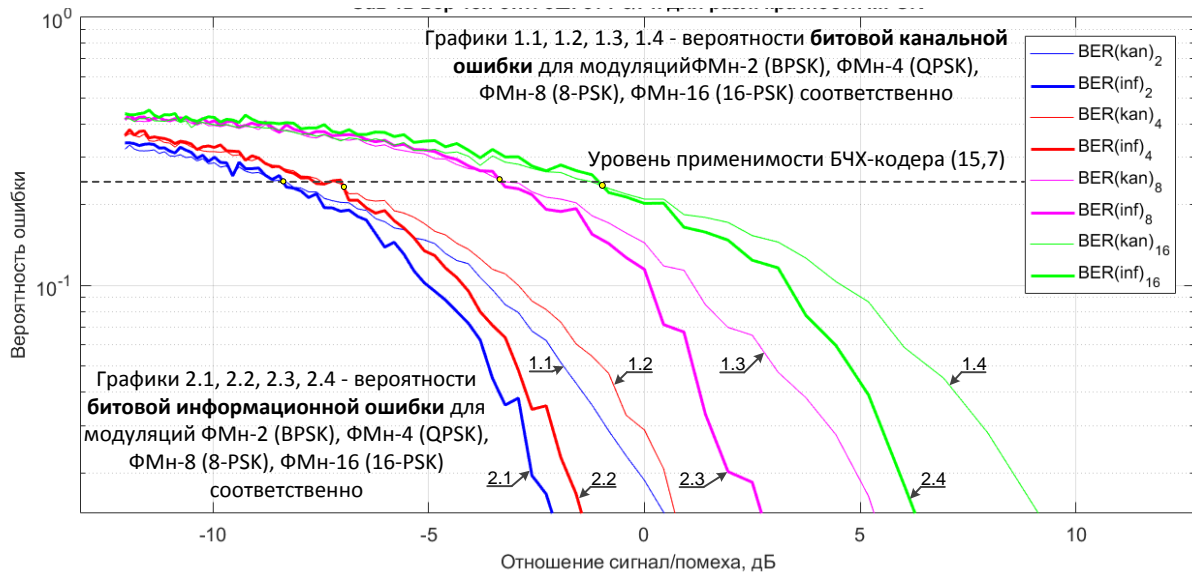


Рис. 6. Графики зависимостей вероятностей битовой информационной и битовой канальной ошибок от отношения сигнал/помеха

Анализ графиков на рис. 6 позволяет сделать вывод, что существует предельный уровень применимости помехоустойчивого кодирования, выше которого кодер лишь размножает ошибки. Для данного случая этот предел составил величину битовой (канальной) ошибки, примерно равной 0,25, независимо от порядка манипуляции M .

На рис. 7 и 8 представлены зависимости защитного отношения от расстройки помехи относительно несущей частоты сигнала для модуляций ФМн-2,4,8,16.

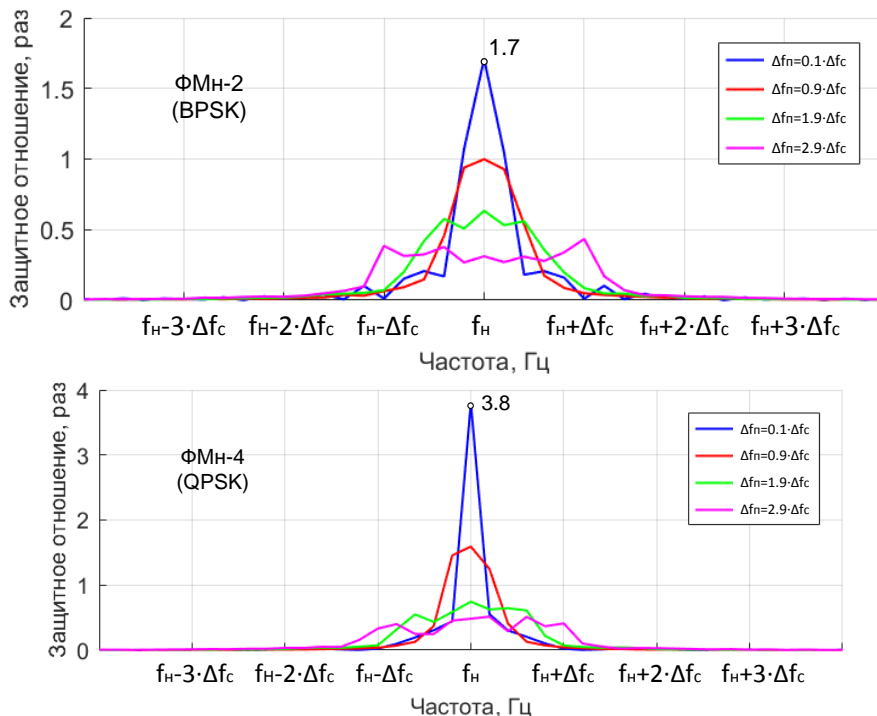


Рис. 7. Графики зависимости γ_z от частоты расстройки помехи относительно несущей частоты сигнала (начало)

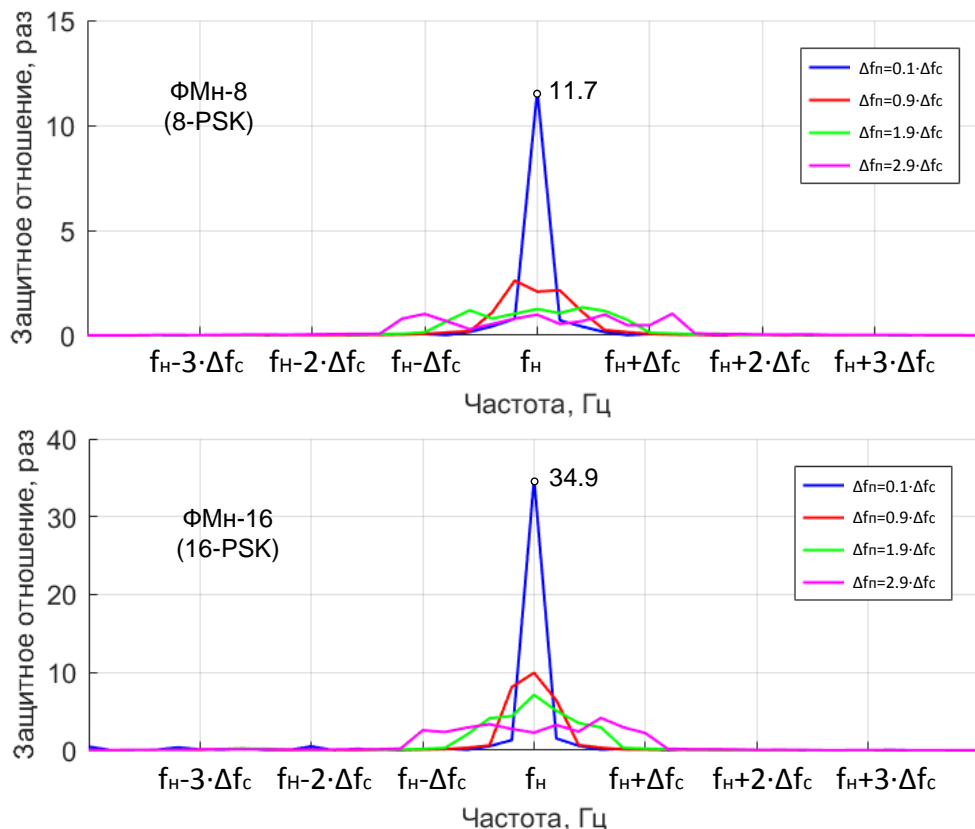


Рис. 7. Графики зависимости γ_z от частоты расстройки помехи относительно несущей частоты сигнала (окончание)

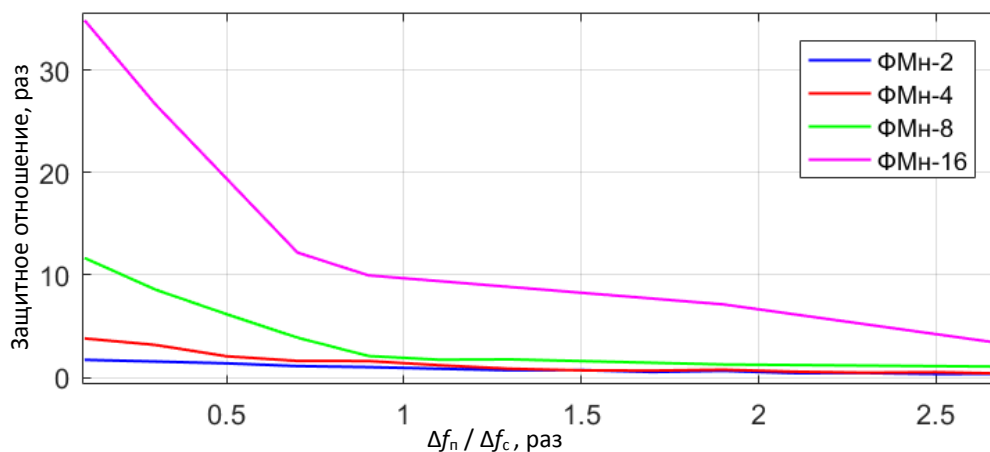


Рис. 8. Графики зависимости γ_z от $(\Delta f_n / \Delta f_c)$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из работы [3] известно что, чем меньше защитное отношение, тем более помехоустойчиво радиоэлектронное средство применительно к рассматриваемой помехе, т. е. устойчивое функционирование РЭС обеспечивается при меньших отношениях сигнал/шум. Анализируя представленные на рис. 7 и 8 графики, можно сделать следующие выводы:

– при рассмотрении прицельной ($f_c = f_n$) шумовой помехи наиболее деструктивное влияние на приемник сигналов с М-ФМн оказывает помеха с шириной спектра не более 10% от ширины спектра сигнала. При этом с увеличением порядка модуляции M реальная помехо-

устойчивость приемника сигналов с М-ФМн существенно падает (ФМн-4 – в 2,2 раза, ФМн-8 – в 6,9 раз, ФМн-16 – в 20,5 раз по сравнению с ФМн-2);

– при увеличении ширины спектра шумовой помехи до значения $\Delta f_{\text{п}} = 2 \cdot \Delta f_{\text{с}}$ и более реальная помехоустойчивость приемника сигналов с модуляцией ФМн-2 и ФМн-4 оказывается примерно одинаковой. Для более узкополосной помехи это правило не выполняется;

– несмотря на более высокое потенциальное деструктивное воздействие узкополосной помехи, на практике более опасными являются помехи с шириной спектра $\Delta f_{\text{п}} \approx \Delta f_{\text{с}}$, в силу того, что вероятность совмещения несущих частот помехи и сигнала оказывается крайне малой величиной по сравнению с вероятностью попадания несущей частоты помехи в полосу частот, занимаемую сигналом.

Список используемых источников

1. *Скляр Б.* Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение: пер. с англ. – Изд. 2-е, испр. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
2. Компьютерное моделирование процессов радиоэлектронной борьбы: учеб. пособие / В.В. Вознюк, А.А. Гусаров, С.А. Зайцев и др.; под ред. В.В. Вознюка. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2011. – Ч. 1: Моделирование радиотехнических и информационных процессов. – 186 с..
3. *Париуткин А.В.* Радиоэлектронная защита радиоэлектронных средств: учеб. пособие. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. – 211 с.
4. *Шахнович И.В.* Современные технологии беспроводной связи. – М.: Техносфера, 2006.
5. *Richard C. Jaffe.* Random Signals for Engineers Using MATLAB and Mathcad. – Springer – Verlaq, 2000. – 376 p.
6. *Антипенский Р.В.* Разработка моделей преднамеренных помех сигналам с дискретной модуляцией // Компоненты и технологии. – 2007. – № 10. – С. 138–143.
7. *Петров А.В.* Помехоустойчивость приема сигналов с двоичной фазовой манипуляцией при воздействии хаотической импульсной помехи со случайной длительностью и фазой радиоимпульса // Радиотехника. – 2018. – № 8. – С. 28–33.
8. *Вознюк В.В., Фомин А.В.* Оценивание качества преднамеренных помех цифровым системам передачи информации методом компьютерного моделирования // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2015. – Вып. 645. – С. 79–87.
9. *Маслаков П.А. Париуткин А.В.* Исследование помехоустойчивости современных стандартов спутниковой связи к воздействию нестационарных помех // Труды СПИИРАН. – 2017. – № 4 (53) – С. 159–177.

В.М. Лихачев,
доктор техн. наук, профессор

ДИФРАКЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН НА ИМПЕДАНСНЫХ КЛИНОВИДНЫХ ТЕЛАХ В ЗАДАЧАХ РАДИОЛОКАЦИИ И РАДИОСВЯЗИ

В статье представлены теоретические основы построения асимптотического решения задачи дифракции цилиндрических электромагнитных волн (ЭМВ) на импедансных клиновидных структурах в квазиоптическом частотном диапазоне. Особое внимание уделено процессу формирования поля поверхностных волн: первичных поверхностных волн различных типов, возбуждаемых на импедансных гранях непосредственно источником и ребром клина, и вторичных, возбуждаемых на импедансных гранях ребром клина при дифракции на нем первичной поверхностной волны.

Построены вычислительные алгоритмы, позволяющие учесть влияние электромагнитного поля падающей ЭМВ на радиофизические характеристики поверхностных волн, возбуждаемых на импедансных гранях рассматриваемых клиновидных структур.

Ключевые слова: дифракция, поверхностная волна, импедансный клин, асимптотическое решение, цилиндрическая волна, квазиоптический диапазон, дифракционный коэффициент, фазовая составляющая.

ВВЕДЕНИЕ

В комплексе задач, решаемых с помощью радиотехнических средств, основными являются задачи радиолокации и радиосвязи.

Для успешного решения любой радиолокационной задачи требуется знание пространственно-временных характеристик полей дифракции электромагнитных волн (ЭМВ), рассеянных в пространстве объектом локации. Облучаемые объекты часто имеют весьма сложную геометрическую форму поверхности, состоящую из гладких участков и многочисленных клиновидных образований различного типа. Объекты имеют многочисленные покрытия с различными радиофизическими свойствами. Поэтому для решения радиолокационных задач требуется знание методов расчета дифракционных полей ЭМВ, возбуждаемых и рассеиваемых различными участками поверхности объектов и, в частности, их клиновидными образованиями, поскольку последние – это одни из основных источников рассеянных волн.

Другой актуальной проблемой является радиосвязь, осуществляемая между объектами. Здесь наиболее сложными стали вопросы проектирования антенн, расположенных на объекте, поскольку эффективность их функционирования тесно связана с геометрическими и радиофизическими свойствами его поверхности.

Так как при заданных габаритно-массовых требованиях веса и места, отводимые для антенно-фидерных устройств, весьма ограничены, неизбежно возникают трудности с таким размещением антенн, при котором их электродинамическое взаимодействие друг с другом и с участками поверхности объекта, на которых они расположены, было бы минимальным. В связи с этим актуальной становится задача определения электродинамических характеристик слабонаправленных антенн, расположенных в окрестности клиновидных структур.

Таким образом, методы расчета электромагнитных полей, формируемых объектами сложной геометрической формы (имеющими угловые образования и неоднородную электродинамическую структуру на поверхности), при облучении их цилиндрической ЭМВ имеют важное прикладное значение. Одним из основных элементов такого расчета является решение задачи о дифракции цилиндрических ЭМВ в угловой области, представляющей собой двугранный угол (клин) с полубесконечными гранями, имеющими так называемые «импе-

данские» электрические характеристики (они будут определены в дальнейшем при задании граничных условий).

Наиболее эффективным методом решения данной задачи является метод, в основе которого лежит представление поля дифракции суперпозицией интегралов, внутренний из которых есть интеграл типа интеграла Зоммерфельда [1]. При этом предполагается, что временная составляющая векторной функции поля дифракции определяется множителем вида $e^{-i\omega t}$, что дает возможность рассматривать в дальнейшем стационарные электромагнитные поля дифракции, зависящие только от пространственных координат.

Однако точное решение задачи указанным способом неприменимо для прикладных задач электродинамики, поскольку не имеет вычислительного алгоритма и физической интерпретации. Поэтому практический интерес представляет построение асимптотического решения указанной дифракционной задачи, позволяющего построить вычислительный алгоритм и провести анализ процесса дифракции, поскольку асимптотическое решение имеет наглядную геометрическую и физическую интерпретации. Достоинство асимптотического метода еще и в том, что имеется возможность вычисления всех отдельных составляющих поля дифракции с соответствующим анализом каждой из них.

Точное решение рассматриваемой дифракционной задачи определяется решением соответствующей граничной задачи математической физики.

ТОЧНОЕ РЕШЕНИЕ ГРАНИЧНОЙ ЗАДАЧИ О ДИФРАКЦИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН НА ИМПЕДАНСНОМ КЛИНЕ

Рассмотрим в пространстве R^3 клиновидную область (двугранный угол), ограниченную двумя импедансными полуплоскостями. Введем в R^3 цилиндрические координаты (r, φ, z) так, чтобы ось Oz совпадала с ребром, в этом случае полубесконечные грани определяются уравнениями: $\varphi = \pm\Phi$, $\Phi \in \left[\frac{\pi}{2}, \pi\right]$ (рис.1.).

Электромагнитная волна, облучающая импедансный клин («падающая» ЭМВ), возбуждается нитевидным электромагнитным источником Q , параллельным ребру. Тогда положение источника, в свою очередь, определяется координатами $Q(r_0, \varphi_0)$, $|\varphi_0| \leq \Phi$, положение точки наблюдения – $M(r, \varphi)$, $|\varphi| \leq \Phi$. Вследствие этого ЭМВ, возбуждаемая источником, является цилиндрической.

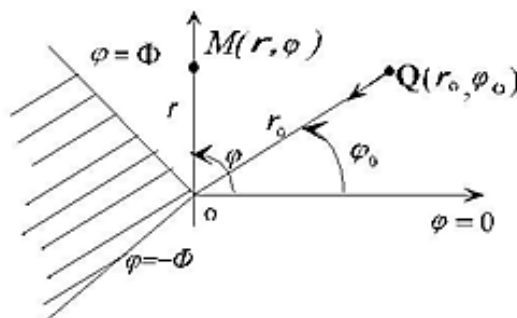


Рис.1. Падение цилиндрической электромагнитной волны на импедансный клин для случаев H - и E -поляризации

Полагаем, что падающая ЭМВ является H - или E -поляризованной. В случае H -поляризации комплексная амплитуда $\dot{\vec{H}}$ вектора напряженности магнитного поля параллельна ребру: $\dot{\vec{H}} = \dot{H}_z \vec{l}_z$, а $(\vec{l}_r, \vec{l}_\phi, \vec{l}_z)$ – ортонормированный базис цилиндрической системы координат.

Согласно [2] точное решение граничной задачи для составляющей \dot{H}_z амплитуды вектора напряженности магнитного поля, возбуждаемого источником $Q(r_0, \varphi_0)$ в произвольной точке наблюдения $M(r, \varphi)$, $-\Phi \leq \varphi \leq \Phi$, определяется выражением

$$\begin{aligned} \dot{H}_z(r, \varphi) = & -i \frac{k I_0^M}{4\Phi c} \int \frac{\cos\left[\left(\frac{\pi}{2\Phi}\right)(\alpha + \varphi)\right]}{\Psi(\alpha + \varphi)} e^{ikr \cos\alpha} \times \\ & \times \int_{\gamma} \frac{\Psi(\beta + \varphi_0) e^{-ikr_0 \cos\beta} d\beta}{\gamma \sin\left[\left(\frac{\pi}{2\Phi}\right)(\beta + \varphi_0)\right] - \sin\left[\left(\frac{\pi}{2\Phi}\right)(\alpha + \varphi)\right]} d\alpha. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь

$$\begin{aligned} \Psi(\delta) = & \cos\left[\left(\frac{\pi}{4\Phi}\right)(\delta + \Phi - \theta_+)\right] \cos\left[\left(\frac{\pi}{4\Phi}\right)(\delta - \Phi + \theta_-)\right] \times \\ & \times \frac{\Psi_\Phi\left(\delta + \Phi - \frac{\pi}{2} + \theta_+\right) \Psi_\Phi\left(\delta - \Phi + \frac{\pi}{2} - \theta_-\right)}{\Psi_\Phi\left(\delta + \Phi - \frac{\pi}{2} - \theta_+\right) \Psi_\Phi\left(\delta - \Phi + \frac{\pi}{2} + \theta_-\right)}, \end{aligned} \quad (2)$$

где I_0^M – комплексная амплитуда линейной плотности магнитного тока в нитевидном источнике;

2Φ – угол раствора клина;

$\Psi_\Phi(z)$ – специальная функция Малюжинца, при этом $z = x_1 + ix_2$.

Контуры интегрирования γ и C показаны на рис. 2 и рис. 3.

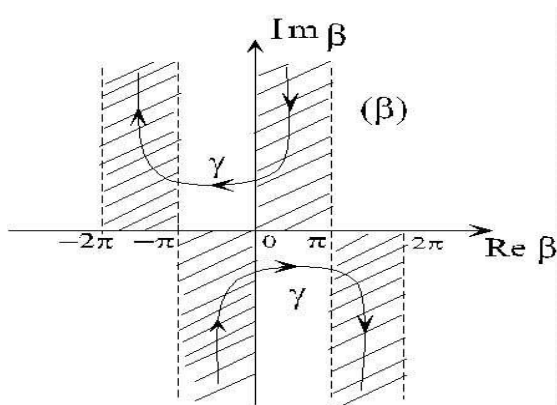


Рис. 2. Контур интегрирования γ на плоскости комплексного переменного β

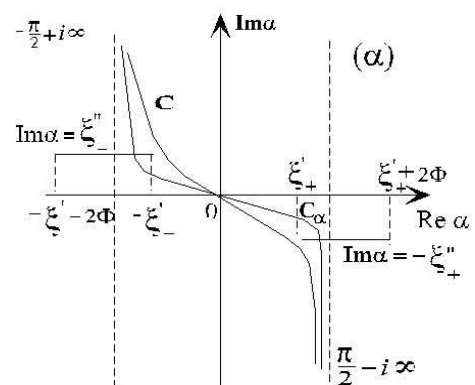


Рис. 3. Контур интегрирования C на плоскости комплексного переменного α

Полагаем $kr \gg 1, kr_0 \gg 1$, что соответствует расположению источника Q и точки наблюдения M не в ближней зоне относительно ребра клина.

Функция Малюжинца является основной в представлении поля дифракции интегралом (1). Она определяется выражением

$$\Psi_{\Phi}(z) = \prod_{n=1}^{\infty} \prod_{m=1}^{\infty} \left[1 - \left(\frac{z}{2\Phi(2n-1) + \frac{\pi}{2}(2m-1)} \right)^2 \right]^{(-1)^{m+1}} \quad (3)$$

и может быть представлена в интегральной форме, на основании которой в работе [3] разработан алгоритм ее вычисления путем представления совокупностью степенных рядов.

АСИМПТОТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ГРАНИЧНОЙ ЗАДАЧИ ДИФРАКЦИИ

Пусть $r \geq r_0, \frac{\pi}{2} \leq \Phi \leq \pi$. Построение асимптотического решения для случая цилиндрических волн возможно при условиях $kr \gg 1, kr_0 \gg 1$ и связано с характером взаимосвязи между полюсами подынтегральных функций внутреннего и внешнего интегралов в выражении (1), а также полюсами внутреннего интеграла и точкой перевала внешнего интеграла, полюсами внешнего интеграла и точкой перевала внутреннего.

Представим контур интегрирования γ на комплексной плоскости (β) (см. рис. 2) в виде совокупности трех контуров $\gamma_0, \gamma_1, \gamma_2$ (рис. 4) и деформируем контур интегрирования C на комплексной плоскости (α) в перевальный контур C_{α} (см. рис. 3).

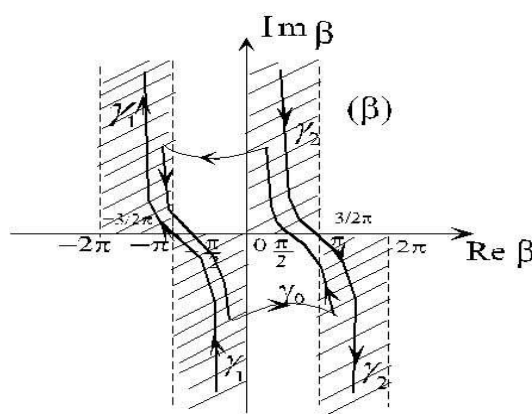


Рис. 4. Разбиение контура интегрирования γ на плоскости комплексного переменного α

Тогда интеграл (1) преобразуется к виду

$$\dot{H}_z(r, \varphi) = i \frac{k \dot{I}_0^M}{4\Phi} \int_{C_{\alpha}} \frac{e^{ikr \cos \alpha}}{\Psi(\alpha + \varphi)} \left[\sum_{m=0}^2 I_m \right] d\alpha, \quad m = 0, 1, 2, \quad (4)$$

где

$$I_m = \int_{\gamma_m} F(\alpha, \beta) e^{-ikr_0 \cos \beta} d\beta,$$

$$F(\alpha, \beta) = \Psi(\beta + \varphi_0) \frac{\cos \frac{\pi}{2\Phi} (\alpha + \varphi)}{2 \sin \frac{\pi}{4\Phi} (\beta + \varphi_0 - \alpha - \varphi) \sin \frac{\pi}{4\Phi} (\beta + \varphi_0 + \alpha + \varphi - 2\Phi)}.$$

В дальнейшем для различных типов полей дифракции функция \dot{H}_z будет определяться путем вычисления соответствующих контурных интегралов из равенства (4) методом перевала и по вычетам в полюсах подынтегральных функций. Рассмотрим поведение указанных полюсов из соотношения (4) на комплексных плоскостях (α) и (β) .

Из всей серии полюсов функции $\frac{1}{\Psi(\alpha + \varphi)}$ в полосу $|\operatorname{Re} \alpha| < \frac{\pi}{2}$ в плоскости (α) , при условии $\frac{\pi}{2} \leq \Phi \leq \pi$, попадают только два полюса:

$$\alpha_{\pm} = -\varphi \pm \Phi \pm \theta_{\pm}, \quad (5)$$

которые при изменении φ от Φ до $-\Phi$ перемещаются на плоскости (α) вдоль прямых $\operatorname{Im} \alpha = \mp \xi_{\pm}''$ в полосах (см. рис. 3):

$$-\xi'_- - 2\Phi \leq \operatorname{Re} \alpha \leq -\xi'_- \quad \text{и} \quad \xi'_+ \leq \operatorname{Re} \alpha \leq \xi'_+ + 2\Phi.$$

При вычислении интеграла по контуру C методом перевала, при выполнении условий $kr \gg 1$ и $kr_0 \gg 1$, перевальный контур C_{α} определяется уравнением [4]

$$\operatorname{Re} \alpha = \arccos \frac{1}{\operatorname{ch}(\operatorname{Im} \alpha)}, \quad (6)$$

т. е. $\operatorname{Re} \alpha = gd(\operatorname{Im} \alpha)$.

Фазовый множитель $e^{ikr \cos \alpha}$ из формулы (1) определяет, что точка перевала контура

$$C_{\alpha} : \alpha_{\text{перев}} = 0. \quad (7)$$

В процессе деформации контура C в перевальный C_{α} им пересекаются полюсы α_{\pm} , если

$$|\operatorname{Re} \alpha_{\pm}| < \arccos \frac{1}{\operatorname{ch}(\xi_{\pm}'')}. \quad (8)$$

В этом случае выражение функции \dot{H}_z определяется суммой перевального асимптотического разложения интеграла по контуру C_{α} и вычетов подынтегральной функции в полюсах α_{\pm} .

Как будет ясно в дальнейшем, перевальное асимптотическое разложение лежит в основе формирования поверхностью клина дифракционного поля рассеяния ЭМВ в дальней зоне (так называемое поле излучения), а вычеты в полюсах α_{\pm} являются основой формирования поля поверхностных волн различных типов, распространяющихся вдоль импедансных граней.

В данной статье ограничимся расчетом и анализом поля поверхностных волн.

Из серии полюсов функции $\Psi(\beta + \varphi_0)$ на плоскости (β) при условии $\frac{\pi}{2} \leq \Phi \leq \pi$ ни один полюс не попадает в полосу $|\operatorname{Re} \beta| \leq \pi$; ближайшими к полосе $|\operatorname{Re} \beta| \leq \pi$, но расположенными вне ее являются полюсы

$$\beta_{\pm} = -\varphi_0 \pm \Phi \pm \pi \pm \theta_{\pm}. \quad (9)$$

Они могут быть пересечены при деформации контуров интегрирования γ_1 и γ_2 в перевальные контуры.

Кроме того, в полосу $|\operatorname{Re}\beta| \leq \pi$ попадают особые точки функций:

$$\left[\sin\left(\frac{\pi}{4\Phi}(\beta + \varphi_0 - \alpha - \varphi)\right) \right]^{-1} \quad \text{и} \quad \left[\sin\left(\frac{\pi}{4\Phi}(\beta + \varphi_0 + \alpha + \varphi - 2\pi)\right) \right]^{-1}, \quad (10)$$

соответствующие полюсам $\alpha = \alpha_{\pm}$:

а) $\beta_{\alpha_{\pm}}^{(1)} = -\varphi_0 \pm \Phi \pm \theta_{\pm}$ – устранимые особые точки, вычет в которых равен 0;

б) $\beta_{\alpha_{\pm}}^{(2)} = -\varphi_0 \pm \Phi \mp \theta_{\pm}$ – полюсы, расположенные внутри контура γ_0 .

Обозначим $I = I_1 + I_2$. Как видно из рис. 4, контуры интегрирования γ_1 и γ_2 в интегралах I_1, I_2 имеют противоположные направления обхода:

$$\left(I_1 = \int_{-\pi+\varepsilon-i\infty}^{-\pi+\varepsilon+i\infty} F(\alpha, \beta) d\beta; \quad I_2 = \int_{\pi-\varepsilon+i\infty}^{\pi+\varepsilon-i\infty} F(\alpha, \beta) d\beta. \right). \quad (11)$$

Применим в интеграле I_1 замену переменной $\beta = -\pi + i\chi$, а в интеграле I_2 – замену переменной $\beta = \pi - i\chi$. Тогда контуры γ_1 и γ_2 отобразятся в контур γ_{χ} на комплексной плоскости (χ), изображенной на рис. 5.

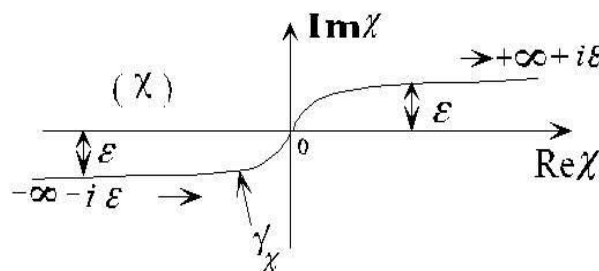


Рис. 5. Отображение контуров интегрирования γ_1 и γ_2 в контур γ_{χ} на плоскости комплексного переменного χ

Получим интеграл

$$I_{\chi} = i \int_{\gamma_{\chi}} \{F(\alpha, -\pi + i\chi) - F(\alpha, \pi - i\chi)\} e^{ikr_0 \operatorname{ch}\chi} d\chi. \quad (12)$$

Тогда полюсам β_{\pm} в выражении (9) будут соответствовать полюсы

$$\chi_{\pm} = i(\mp \varphi_0 + \Phi + \theta_{\pm}). \quad (13)$$

Функция $F(\alpha, -\pi + i\chi) - F(\alpha, \pi - i\chi)$ задана на комплексной плоскости (χ).

Таким образом,

$$\dot{H}_z(r, \varphi) = i \frac{k I_0^M}{4\Phi} \int_{C_{\alpha}} \frac{e^{ikr \cos\alpha}}{\Psi(\alpha + \varphi)} [I_0 + I_{\chi}] d\alpha. \quad (14)$$

При деформации контуров γ_1 и γ_2 в перевальные контур γ_{χ} также деформируется в перевальный контур γ_{χ}^{Π} .

Фазовый множитель $e^{ikr_0 \operatorname{ch}\chi}$ из формулы (12) показывает, что точка перевала контура

$$\gamma_{\chi}^{\Pi} : \chi_{\text{перев}} = 0. \quad (15)$$

Поле поверхностных волн $H_z^{\text{П.В.}}(r, \phi)$, возбуждаемых цилиндрической ЭМВ источника и распространяющихся вдоль импедансных граней, представляется в виде суммы слагаемых, определяющих магнитные поля составляющих поверхностных волн различных типов.

РАСЧЕТ И АНАЛИЗ СОСТАВЛЯЮЩИХ ПОЛЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН

Вычислим интегралы по контурам γ_0 и C в соотношении (14) соответственно по вычетам в полюсах $\beta = \beta_{\alpha_{\pm}}^{(2)}$ и α_{\pm} при условии, что $|\varphi \pm \Phi| \leq \frac{\pi}{2}$, $|\varphi_0 \pm \Phi| \leq \pi$:

$$\begin{aligned} \dot{H}_{z\text{пов}}^{\pm}(r, \varphi) = & k I_0 8\Phi \frac{\cos\left[\frac{\pi}{2\Phi}(\Phi + \theta_{\pm})\right] \cos\left[\frac{\pi}{4\Phi}(\theta_+ - \theta_-)\right] \Psi_{\Phi}^2\left(2\Phi - \frac{\pi}{2}\right)}{\cos\left[\frac{\pi}{4\Phi}(\theta_+ + \theta_-)\right] \Psi_{\Phi}\left(\theta_- \pm \frac{\pi}{2} - \theta_+\right) \Psi_{\Phi}\left(\frac{\pi}{2} \mp \theta_- \pm \theta_+\right)} \times \\ & \times \frac{\Psi_{\Phi}\left(-\frac{\pi}{2} + \theta_+ + \theta_-\right) \Psi_{\Phi}\left(\frac{\pi}{2} + \theta_{\mp} + \theta_{\pm}\right)}{\Psi_{\Phi}\left(\pm 2\Phi \mp \frac{\pi}{2} \mp 2\theta_{\pm}\right) \Psi_{\Phi}\left(2\Phi - \frac{\pi}{2} + 2\theta_{\pm}\right)} \times e^{i\left[k(r\cos(\mp\varphi + \Phi + \theta_{\pm}) - r_0\cos(\mp\varphi_0 + \Phi - \theta_{\pm})) \pm \frac{\pi}{2}\right]}. \quad (16) \end{aligned}$$

Анализ амплитудных и фазовых сомножителей показывает, что выражение (16) определяет поле поверхностных волн, возбуждаемое на гранях клина непосредственно источником поля Q . При этом можно показать, что в случае, когда $\theta_{\pm} = -i\xi_{\pm}''$ (так называемый индуктивный импеданс), при увеличении ξ_{\pm}'' происходят возрастание амплитуды напряженности поля $\dot{H}_{z\text{пов}}^{\pm}$, замедление распространения поверхностных ЭМВ вдоль граней и затухание их в направлении нормали к поверхности клина.

Величины $k \text{ch}\xi_{\pm}''$ определяют постоянные замедления поверхностных волн вдоль импедансных граней, а значения $k \text{sh}\xi_{\pm}''$ – постоянные затухания поверхностных ЭМВ в направлении нормали к поверхности импедансных граней.

Вычисляя внутренний интеграл (12) по вычетам в полюсах χ_{\pm} (13), а внешний интеграл по контуру C – соответственно по вычетам в полюсах α_{\pm} , при условии, что $\varphi \in \left(-\Phi - \frac{\pi}{2}, -\Phi + \frac{\pi}{2}\right) \cup \left(\Phi - \frac{\pi}{2}, \Phi + \frac{\pi}{2}\right)$, получим

$$\dot{H}_{z\text{пов.отр}}^{\pm}(r, \varphi) = k I_0 2\pi \times \frac{\cos\left[\frac{\pi}{2\Phi}(\Phi + \theta_{\pm})\right] \cos\left[\frac{\pi}{4\Phi}(\pi + \theta_+ + \theta_-)\right] \cos\left[\frac{\pi}{4\Phi}(\pi + 2\Phi)\right]}{\cos\left[\frac{\pi}{4\Phi}(\theta_+ + \theta_-)\right] \sin\left(\frac{\pi^2}{4\Phi}\right) \cos\left[\frac{\pi}{4\Phi}(\pi + 2\Phi + 2\theta_{\pm})\right]} \times$$

$$\begin{aligned} & \Psi_{\Phi} \left(\frac{\pi}{2} + \theta_+ + \theta_- \right) \Psi_{\Phi} \left(2\Phi - \frac{\pi}{2} \right) \Psi_{\Phi} \left(\pm \frac{3\pi}{2} - \theta_- + \theta_+ \right) \Psi_{\Phi} \left(\frac{\pi}{2} + 2\Phi + 2\theta_{\pm} \right) \\ & \times \frac{\Psi_{\Phi} \left(2\Phi - \frac{\pi}{2} + 2\theta_{\pm} \right) \Psi'_{\Phi} \left(\frac{\pi}{2} + \theta_{\pm} - \theta_{\mp} \right) \Psi_{\Phi} \left(\frac{3\pi}{2} + \theta_+ + \theta_- \right)}{\Psi_{\Phi} \left(2\Phi - \frac{\pi}{2} + 2\theta_{\pm} \right) \Psi'_{\Phi} \left(\frac{\pi}{2} + \theta_{\pm} - \theta_{\mp} \right) \Psi_{\Phi} \left(\frac{3\pi}{2} + \theta_+ + \theta_- \right)} \times \\ & \times e^{i \left[k(r \cos(\mp \varphi + \Phi + \theta_{\pm}) + r_0 \cos(\mp \varphi_0 + \Phi + \theta_{\pm})) - \frac{\pi}{2} \right]}. \end{aligned} \quad (17)$$

Из анализа структуры амплитудных и фазовых множителей равенства (17) следует, что функции $\dot{H}_{z_{\text{пов.отр}}}^{\pm}$ определяют отраженные поверхностные волны, возникающие на импедансных гранях вследствие отражения от ребра поверхностных волн, возбуждаемых источником ($\dot{H}_{z_{\text{пов.}}}^{\pm}$), и направленные вдоль тех же граней от ребра «назад». Далее при условии $|\Phi \pm \varphi| < \frac{\pi}{2}$, в результате вычисления внутреннего интеграла I_{χ} в равенстве (14) по вычетам в полюсах χ_{\pm} , а внешнего по контуру C – по вычетам соответственно в полюсах α_{\mp} , получим

$$\begin{aligned} \dot{H}_{z_{\text{пов.отр}}}^{\pm}(r, \varphi) &= kI_0 2\pi \times \frac{\cos \left[\frac{\pi}{2\Phi} (\Phi + \theta_{\mp}) \right] \cos \left[\frac{\pi}{4\Phi} (\pi + \theta_+ + \theta_-) \right]}{\cos \left[\frac{\pi}{2\Phi} (\theta_+ + \theta_-) \right] \cos \left[\frac{\pi}{4\Phi} (\pi + 2\Phi + 2\theta_{\mp}) \right]} \times \\ & \times \frac{\cos \left(\frac{\pi}{4\Phi} \right) (\pi + 2\Phi) \Psi_{\Phi} \left(\frac{3\pi}{2} + \theta_{\pm} - \theta_{\mp} \right) \Psi_{\Phi} \left(\frac{\pi}{2} + 2\Phi + 2\theta_+ \right) \Psi_{\Phi} \left(\frac{\pi}{2} - 2\Phi \right)}{\sin \left(\frac{\pi^2}{4\Phi} \right) \Psi_{\Phi} \left(\frac{\pi}{2} + 2\Phi \right) \Psi_{\Phi} \left(\frac{3\pi}{2} + \theta_+ + \theta_- \right) \Psi_{\Phi} \left(-\frac{\pi}{2} + 2\pi + 2\theta_{\mp} \right)} \times \\ & \times \frac{\Psi_{\Phi} \left(\frac{\pi}{2} + \theta_+ - \theta_- \right)}{\Psi_{\Phi} \left(\frac{\pi}{2} \pm \theta_- \mp \theta_+ \right)} e^{i \left[k(r \cos(\pm \varphi + \Phi + \theta_{\mp}) + r_0 \cos(\mp \varphi_0 + \Phi + \theta_{\pm})) + \frac{\pi}{2} \right]}. \end{aligned} \quad (18)$$

Равенство (18) определяет слагаемые $\dot{H}_{z_{\text{пов.пр}}}^{\pm}$, которые описывают поверхностные волны, переходящие с одной грани клина $\varphi = \Phi$ на другую, противоположную, грань $\varphi = -\Phi$, и наоборот. Переходные поверхностные волны порождаются дифракцией исходной поверхностной волны $\dot{H}_{z_{\text{пов}}}^{\pm}$ на ребре.

Наконец, при условиях $|\Phi \pm \varphi| < \frac{\pi}{2}$ и $kr_0 \gg 1$, вычисляя внутренний интеграл I_{χ} в равенстве (14) методом перевала, а внешний интеграл по контуру C – по вычетам в полюсах α_{\pm} , получим следующее выражение:

$$\begin{aligned} \dot{H}_{z\text{пов.р}}^{\pm}(r, \varphi) = & \mp k I_0 \sqrt{\frac{2\pi}{kr_0}} \times \frac{\Psi_{\Phi}\left(2\Phi + \frac{\pi}{2}\right) \Psi_{\Phi}\left(\frac{\pi}{2} + \theta_+ + \theta_- \right)}{\cos\left[\left(\frac{\pi}{4\Phi}\right)(\theta_+ + \theta_-)\right] \Psi_{\Phi}\left(2\Phi - \frac{\pi}{2} + 2\theta_{\pm}\right) \Psi_{\Phi}\left(\frac{\pi}{2} + \theta_{\pm} - \theta_{\mp}\right)} \times \\ & \times \left\{ \Psi\left(\pi + \varphi_0\right) \left[\text{ctg}\left(\left(\frac{\pi}{4\Phi}\right)(\pi + \varphi_0 \mp \Phi \mp \theta_{\pm})\right) - \text{ctg}\left(\left(\frac{\pi}{4\Phi}\right)(\pi + \varphi_0 + \Phi \pm \theta_{\pm} - 2\Phi)\right) \right] \right\} \times \\ & \times e^{i\left[k(r_0 + r \cos(\varphi \mp \Phi \mp \theta_{\pm})) + \frac{\pi}{4}\right]}. \end{aligned} \quad (19)$$

Структура амплитудных и фазовых сомножителей соотношения (19) свидетельствует о том, что функции $\dot{H}_{z\text{пов.р}}^{\pm}$ определяют вторичные поверхностные волны, возбуждаемые ребром клина при падении на ребро ЭМВ от источника.

Множители экспонент в равенствах (17)–(19) есть дифракционные коэффициенты, характеризующие амплитуды отраженных, переходных поверхностных волн и поверхностных волн, возбуждаемых ребром клина.

Таким образом, поле поверхностных волн определяется суммой вида (рис. 6)

$$\dot{H}_z^{\text{П.В.}} = \dot{H}_{z\text{пов}}^{\pm} + \dot{H}_{z\text{пов.отр}}^{\pm} + \dot{H}_{z\text{пов.пр}}^{\pm} + \dot{H}_{z\text{пов.р}}^{\pm}. \quad (20)$$

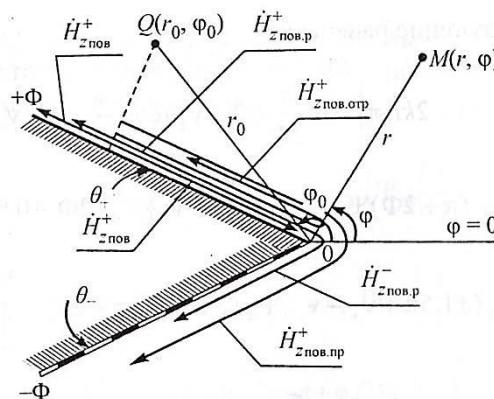


Рис. 6. Лучевая структура магнитного поля поверхностных волн, возбуждаемых на гранях импедансного клина непосредственно источником поля

Полученные результаты позволяют произвести численное моделирование процессов формирования в квазиоптическом частотном диапазоне различных типов поверхностных волн на гранях импедансного клина в широком спектре изменения его геометрических и электродинамических параметров.

Вычисляя внутренний интеграл I_{χ} в равенстве (14) по вычетам в полюсах χ_{\pm} , а внешний интеграл по контуру C – методом перевала при условиях $kr \gg 1$, $|\Phi - \varphi_0| \leq \frac{\pi}{2}$, ограничиваясь главной частью асимптотического разложения, получим следующее соотношение:

$$\dot{H}_z^{\pm}{}_{\text{диф.пов}} = \pm k I_0 \frac{\pi}{4\Phi} \sqrt{\frac{2\pi}{kr}} \Psi_1 \Psi_2 e^{i\left[kS_{\text{диф.пов}} - \frac{\pi}{4}\right]},$$

$$\Psi_1 = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{4\Phi}\varphi\right)\cos\left[\frac{\pi}{4\Phi}(\pi + \theta_+ + \theta_-)\right]\cos\left[\frac{\pi}{4\Phi}(\pi + 2\Phi)\right]}{\Psi(\varphi)\sin\left[\frac{\pi}{4\Phi}(\pi + \Phi + \theta_{\pm} \mp \varphi)\right]\Psi'_{\Phi}\left(\frac{\pi}{2} + 2\Phi\right)},$$

$$\Psi_2 = \frac{\Psi_{\Phi}\left(\frac{\pi}{2} + 2\Phi + 2\theta_{\pm}\right)\Psi_{\Phi}\left(\pm\frac{3}{2}\pi + \theta_+ + \theta_-\right)}{\cos\left[\frac{\pi}{4\Phi}(\pi + \Phi + \theta_{\pm} \pm \varphi)\right]\Psi_{\Phi}\left(\frac{3}{2}\pi + \theta_+ + \theta_-\right)}, \quad (21)$$

где эйконал представлен выражением

$$S_{\text{диф.пов}} = r + r_0 \cos(\mp\varphi_0 + \Phi + \theta_{\pm}). \quad (22)$$

Анализ структуры амплитудного и фазового множителей составляющей $\dot{H}_{z\text{диф.пов}}^{\pm}$ показывает, что равенство (21) характеризует поле излучения в дальней зоне вследствие дифракции на ребре поверхностных волн ($\dot{H}_{z\text{пов.}}^{\pm}$), возбуждаемых цилиндрической ЭМВ источника на импедансных гранях.

При удалении источника от клина

$$\left|\dot{H}_{z\text{диф.пов}}^{\pm}\right| \xrightarrow{r_0 \rightarrow \infty} 0.$$

Таким образом, поле поверхностных волн ($\dot{H}_{z\text{пов.}}^{\pm}$), возбуждаемое источником на импедансных гранях, вследствие дифракции волн на ребре клина, распределяется между полем излучения в дальней зоне $\dot{H}_{z\text{диф.пов}}^{\pm}$ и совокупностью составляющих полей поверхностных волн: $\dot{H}_{z\text{пов.отр}}^{\pm}$, $\dot{H}_{z\text{пов.пр}}^{\pm}$.

Расчеты показывают, что при весьма малых значениях поверхностного импеданса ($\xi_{\pm}'' = 0,1 \div 0,8$) энергия поля поверхностных волн, возбуждаемых источником ($\dot{H}_{z\text{пов.}}^{\pm}$), в основном рассеивается ребром в окружающее пространство. При больших значениях импеданса ($\xi_{\pm}'' > 1,5$) и угле раствора $\Phi \geq 0,75\pi$ энергия поверхностных волн ($\dot{H}_{z\text{пов.}}^{\pm}$), возбуждаемых источником на гранях, в основном распределяется между отраженными и переходными поверхностными волнами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При исследовании процессов дифракции ЭМВ на реальных объектах различные части их поверхности должны быть аппроксимированы поверхностями, имеющими такие геометрические и радиофизические свойства, для которых известны аналитические решения соответствующих модельных задач дифракции волн различных типов и поляризации. В частности, «угловые образования» поверхности оптимально аппроксимировать импедансными клиновидными структурами. В процессе проектирования бортовых антенн также можно использо-

вать важные для радиотехнических приложений электродинамические свойства импедансных клиновидных структур.

Например, свойство импедансного клина формировать в дальней зоне поле излучения $\dot{H}_{z \text{ диф. пов}}^{\pm}$ за счет дифракции на ребре поверхностной волны ($\dot{H}_{z \text{ пов}}^{\pm}$) (рис. 7) можно использовать при создании на корпусе космического аппарата (КА) типа «Буран» антенны поверхностных волн, имеющей клиновидную структуру и возбуждаемой H -поляризованным щелевидным источником Q цилиндрической волны, расположенным на одной из импедансных граней.

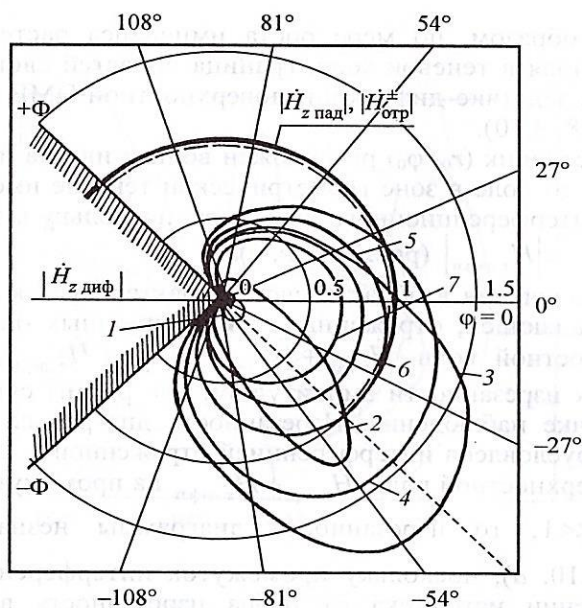


Рис. 7. Дифракция на ребре поверхностных волн, возбуждаемых падающей цилиндрической ЭМВ на импедансных гранях

Такие антенны могут быть эффективно использованы на участке входа спускаемого аппарата в атмосферу, когда вокруг его корпуса возникает слой высокотемпературной плазмы, препятствующий прохождению радиосигнала в направлении нормали к поверхности корпуса. Это делает связь на участке спуска крайне затрудненной.

Таким образом, на основании полученных результатов можно сформулировать принципы построения бортовых антенн сантиметрового и дециметрового диапазонов волн, построенных на основе антенн поверхностных волн круговой поляризации левого и правого направления вращения, использующих дифракцию поверхностных волн на ребре импедансного клина, и можно произвести расчет характеристик направленности указанных антенн.

Рассмотренная методика может являться основой для разработки соответствующих моделей электродинамического расчета полей дифракции ЭМВ и для верификации уже используемых моделей. Особенность ее заключается в том, что задача рассеяния ЭМВ решена асимптотическими методами применительно к импедансным клиновидным структурам, которые являются неотъемлемой частью объектов радиолокационного наблюдения.

В частности, методика может найти применение для решения задач:

- оценки радиолокационных характеристик сложных объектов;
- проектирования антенн;
- антенных измерений;
- проектирования специальных радиотехнических систем и средств.

Список используемых источников

1. *Малюжинец Г.Д.* Интегралы Зоммерфельда и их приложение. – Д.: ЛЦНИИ «Румб», 1981. – 31 с.
2. *Кравченко В.Ф., Лихачев В.М., Сташкевич А.И.* Об одном асимптотическом методе решения краевой задачи о возбуждении импедансного клина // Доклады Академии наук СССР. – 1989. – Т. 308, № 2. – С. 329–334. – (Матем. физика).
3. *Лихачев В.М., Сташкевич А.И., Катранов А.Г.* Об одной специальной функции математической теории дифракции // Дифференциальные уравнения с частными производными: межвузовский сб. науч. тр. – Л.: ЛГПИ им. А.Н. Герцена, 1989. – С. 72–77.
4. Теория рассеяния электромагнитных волн в угловых структурах / А.Ф. Крячко, В.М. Лихачев, С.Н. Смирнов, А.И. Сташкевич. – СПб.: Наука, 2009. – 194 с.

Г.В. Никитин;
С.С. Старицин,
кандидат техн. наук;
А.В. Шишкалов,
кандидат техн. наук, доцент

МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОТОКОЛЬНЫХ БЛОКОВ С ПАКЕТНЫМ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕМ РЕЧЕВЫХ ДАННЫХ АБОНЕНТОВ

В статье рассмотрена процедура формирования протокольных блоков прикладного уровня с мультиплексированием речевых данных, передаваемых по каналам спутниковых систем связи с коммутацией пакетов. Разработана модель протокольных блоков прикладного уровня с мультиплексированием речевых данных абонентов, учитывающая изменение скорости кодирования речи в процессе передачи речевого сообщения, динамическое размещение речевых кадров и кадров с параметрами комфортного шума в структуре протокольного блока данных. Проведены оценивание и сравнение требуемой пропускной способности канала связи при передаче речевых данных по протоколу с пакетным мультиплексированием речевых данных на основе разработанной модели и по протоколу RTP.

Ключевые слова: мультиплексирование речевых данных, протоколы передачи речи.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в спутниковых системах связи (ССС) с коммутацией пакетов применяются различные способы сокращения избыточности передаваемой информации для обеспечения эффективного использования канала связи [1]. Например, для кодирования голоса абонента широкое распространение получило адаптивное низкоскоростное кодирование речи. В этом случае аналоговый речевой сигнал абонента преобразуется в последовательность блоков данных – речевых кадров и кадров с параметрами комфортного шума [2]. Их передача по каналам СССР с коммутацией пакетов осуществляется по протоколам различных уровней эталонной модели взаимодействия открытых систем (ЭМВОС). В частности, применение стандартизованного протокола RTP (Real-time Transport Protocol) на прикладном уровне ЭМВОС для передачи речи в реальном времени предполагает добавление служебной информации в виде заголовков протоколов IP (Internet Protocol), UDP (User Datagram Protocol) и самого RTP [3].

Протокол RTP разработан как универсальное правило обмена различной мультимедийной информацией в реальном времени. При передаче речевых данных локальной автоматической телефонной станцией (АТС) заголовок RTP содержит избыточную информацию в виде полей, которые не используются или имеют размер больше требуемого. При переходе современных систем связи к использованию низкоскоростного кодирования с детектором активности речи доля избыточности, содержащейся в служебной информации протокола RTP, значительно возросла. Например, если размеры кадра с параметрами комфортного шума или речевого кадра будут составлять 39 или 95 бит соответственно, то для их передачи по каналу связи необходимо добавить заголовки протоколов IP, UDP и RTP, суммарный размер которых будет составлять 320 бит. На сегодняшний день для сокращения избыточности при передаче речевых данных локальных АТС в групповом канале СССР многие производители оборудования (например, Hughes, iDirect, ViaSat, Comtech и др.) разрабатывают свои собственные фирменные протоколы пакетного мультиплексирования речевых данных (ПМРД), описания которых нет в открытом доступе.

В системах с коммутацией пакетов обмен речевыми данными между узлами сети на прикладном уровне ЭМВОС осуществляется с помощью протокольных блоков речевых данных (ПБРД). Исследование вариантов построения структуры ПБРД с пакетным мультиплексированием позволит повысить эффективность использования ресурса спутникового канала связи. Для этого необходимо модельное описание. Существующая модель формирования ПБРД, построенная на основе протокола RTP [4], не учитывает принципы пакетного мультиплексирования речевых данных множества абонентов. Вопросы мультиплексирования в системах связи рассматривались в работах Е.А. Новикова [5], А.А. Ковальского [6], Ман-Куонг Нгуен [7], но мультиплексирование речевых данных абонентов на прикладном уровне не было рассмотрено. Структуры ПБРД, используемых для транспортировки данных речи в системах с ПМРД и без мультиплексирования, существенно отличаются друг от друга (рис. 1)

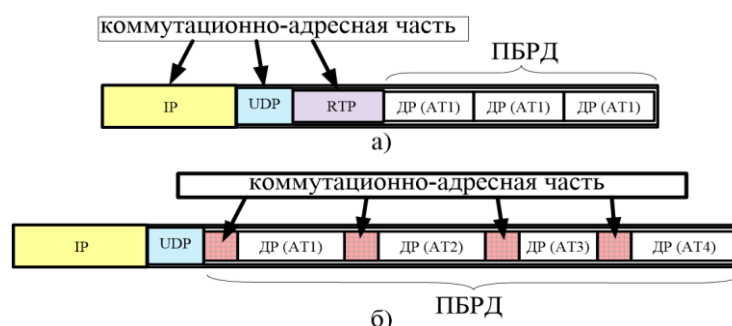


Рис. 1. Структура ПБРД:

а – без мультиплексирования; б – с мультиплексированием

Цель работы состоит в исследовании путей повышения эффективности использования частотного ресурса ССС военного и специального назначения на основе модели формирования ПБРД, учитывающей пакетное мультиплексирование речевых данных абонентов в один блок, переменный размер блоков речевых данных, их динамическое размещение в структуре ПБРД и инвариантность по отношению к различным вариантам реализации конкретного оборудования.

ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СТРУКТУРЫ ПРОТОКОЛЬНОГО БЛОКА С ПАКЕТНЫМ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕМ РЕЧЕВЫХ ДАННЫХ АБОНЕНТОВ

При низкоскоростном кодировании речи аналоговый сигнал исходного речевого сообщения $u(t)$ разбивается на временные интервалы $t_{\text{нкp}}$, на которых оцениваются его параметры. В результате на выходе кодера речи на интервалах $t_{\text{нкp}}$ формируются блоки данных $B_{\{\}}$ (речевые кадры или кадры с параметрами комфортного шума) с информацией о параметрах сигнала, каждый из которых представляет собой последовательность $L^{(\text{pk})}$ двоичных символов. Размер блока речевых данных зависит от алгоритма кодирования речи. В случае применения адаптивного низкоскоростного кодирования речи алгоритм кодирования может быть установлен для каждого блока в отдельности. По сравнению с передачей данных, передача речи в реальном масштабе времени предъявляет к цифровым системам передачи жесткие требования по времени доставки пакетов. При этом допускается потеря некоторой доли речевых данных вследствие перегрузок, возникающих в сети. Кроме того, в таких системах возникает флуктуация времени задержки t_3 , получаемой пакетами в процессе передачи по каналам связи.

На протокол ПМРД возлагаются следующие функции:

- транспортировка блоков с данными речи до адресата с минимальной задержкой;
- восстановление исходного порядка следования и обнаружение потерь блоков с данными речи;

- определение моментов времени для декодирования речевых кадров и кадров с параметрами комфортного шума;
- определение приемной стороной алгоритма для декодирования каждого принятого блока речевых данных.

Таким образом, для выполнения вышеперечисленных функций, возлагаемых на ПБРД, с помощью которых осуществляется транспортировка речевых данных, разрабатываемая модель протокольного блока с пакетным мультиплексированием речевых данных абонентов должна содержать описание следующих структурных элементов:

- поля «адресная часть» Ξ , позволяющего получателю производить отбор из множества блоков речевых данных только тех, которые относятся к одному речевому сообщению;
- поля «номер по порядку» Φ , которое позволяет восстановить исходный порядок следования речевых кадров и кадров с параметрами комфортного шума, а также обнаруживать их потери;
- поля «метка времени» T , позволяющего устранить последствия флуктуации времени доставки и декодировать речевые кадры и кадры с параметрами комфортного шума в нужные моменты времени;
- поля «тип полезной нагрузки» Θ , указывающего применяемый алгоритм сжатия для блока речевых данных.

Исключение любого из вышеперечисленных структурных элементов из ПБРД приведет к невозможности функционирования ССС с пакетным мультиплексированием речевых данных.

Особенностью структуры ПБРД является то, что он формируется путем мультиплексирования речевых данных переменного размера от множества источников, к каждому из которых добавлен заголовок со служебной информацией (рис. 1,б). Объединение блока речевых данных (речевого кадра или кадра с параметрами комфортного шума) и добавленного к нему заголовка будем называть сегментом ПБРД (рис. 2).



Рис. 2. Сегмент ПБРД

С учетом анализа вышесказанного протокольный блок с пакетным мультиплексированием речевых данных абонентов W_j может быть представлен как конкатенация множества структурных элементов – полей, характерных для мультиплексирования речевых данных:

$$W_j = \{C_{j,1}, C_{j,2}, \dots, C_{j,v}, \dots, C_{j,V_j}\}, \quad (1)$$

$$C_{j,v} = \{\Xi_{j,v}, \Theta_{j,v}, \Phi_{j,v}, T_{j,v}, B_{j,v}\},$$

где W_j – j -й протокольный блок с пакетным мультиплексированием речевых данных;

$C_{j,v}$ – v -й сегмент j -го ПБРД;

$B_{j,v}$ – блок речевых данных, передаваемый в v -м сегменте j -го ПБРД;

$\Xi_{j,v}$ – поле «адресная часть», $\Xi_{j,v} = \langle \xi_{1,j,v}, \xi_{2,j,v}, \dots, \xi_{l_{\Xi},j,v}, \dots, \xi_{L^{(a)},j,v} \rangle$, $\xi_{l_{\Xi},j,v} \in \{0,1\}$;

$\Theta_{j,v}$ – поле «идентификатор длины», $\Theta_{j,v} = \langle \theta_{1,j,v}, \dots, \theta_{l_{\Theta},j,v}, \dots, \theta_{L^{(n)},j,v} \rangle$, $\theta_{l_{\Theta},j,v} \in \{0,1\}$;

$\Phi_{j,v}$ – поле «номер по порядку», $\Phi_{j,v} = \langle \phi_{1,j,v}, \phi_{2,j,v}, \dots, \phi_{l_{\Phi},j,v}, \dots, \phi_{L^{(m)},j,v} \rangle$, $\phi_{l_{\Phi},j,v} \in \{0,1\}$;

$T_{j,v}$ – поле «метка времени», $T_{j,v} = \langle \tau_{1,j,v}, \tau_{2,j,v}, \dots, \tau_{l_T,j,v}, \dots, \tau_{L^{(mb)},j,v} \rangle$, $\tau_{l_T,j,v} \in \{0,1\}$.

Формируемая структура j -го ПБРД прикладного уровня с мультиплексированием речевых данных представлена на рис.3.

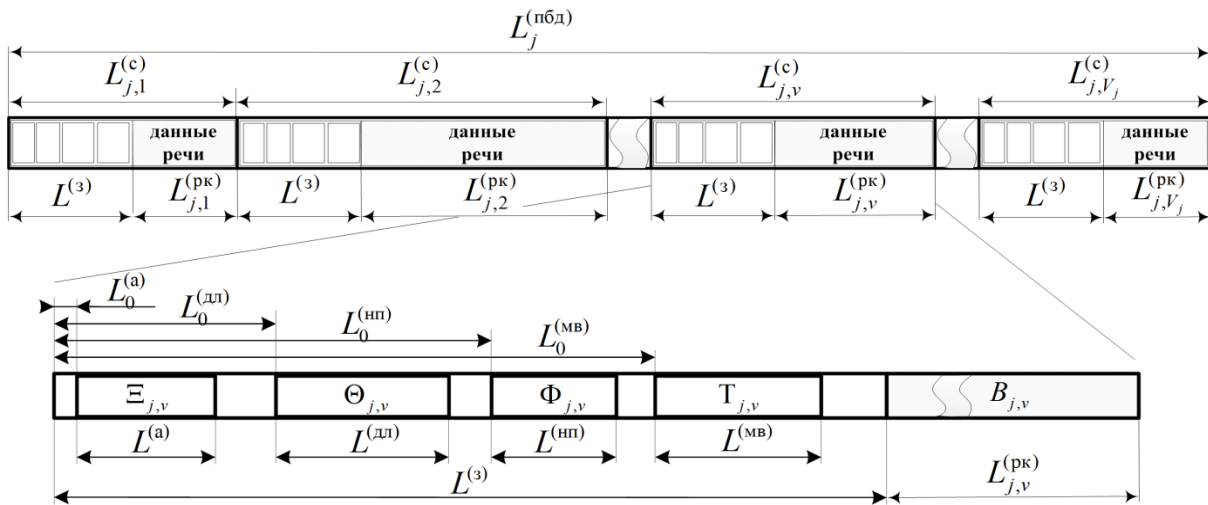


Рис. 3. Структура j -го протокового блока с пакетным мультиплексированием речевых данных абонентов

Число источников речевых данных, которые мультиплексируются, не является постоянным для разных интервалов времени, следовательно, число сегментов V_j может изменяться для каждого W_j ПБРД в отдельности.

В поле «идентификатор длины» содержится информация о размере текущего сегмента ПБРД, поэтому

$$\Theta_{j,v} = \Upsilon^{(дл)}(L_{j,v}^{(c)}). \quad (2)$$

В большинстве практических случаев $\Upsilon^{(дл)}$ описывается выражением

$$\Theta_{j,v} = k_{дл} \cdot L_{j,v}^{(c)} + d_{дл}, \quad (3)$$

где $k_{дл}$ – коэффициент;

$d_{дл}$ – постоянная составляющая.

В простейшем случае в поле «идентификатор длины» в двоичном виде может указываться число байт, следующих за данным полем до конца сегмента ПБРД. Исходя из того, что для низкоскоростного кодирования речи максимальная скорость кодирования составляет 16 кбит/с, а $t_{нкр} = 20$ мс, размер речевого кадра $L^{(рк)}$ не превышает 40 байт (320 бит). При этом размер заголовка, добавляемого к каждому блоку речевых данных, в системах ПМРД не должен превышать 12 байт (так как размер заголовка универсального протокола RTP составляет 12 байт). На основании вышесказанного размер сегмента ПБРД не должен превышать 52 байта и для его кодирования требуется до шести бит. Для учета того, что заголовок может иметь байт-ориентированные размеры структурного элемента, в рамках модели максимально возможный размер поля «идентификатор длины» примем равным одному байту (рис. 4).

Необходимо учитывать, что размер речевого кадра может принимать ограниченное множество значений. Например, кодек AMR-NB может формировать блоки речевых данных только девяти различных размеров. Исходя из этого для передачи информации о скорости кодирования кодека AMR-NB для поля «идентификатор длины» достаточно использовать всего четыре двоичных символа. Для кодеков с меньшим числом скоростей кодирования размер поля может быть еще меньше.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
16	108	18	81	8	97	168	79	5	82	108	186	118	164	146	154	126	101	188	198	8							
16	100	11	81	8	32	240	71	68	138	145	205	169	195														
16	104	25	81	8	64	80	79	37	64	248	100	248	127	225	133	23	210	165	8	54	44	23	153	249	75	0	0
16	96	11	81	8	4	228	64	68	155	30	13	160	74														
16	100	18	81	8	39	244	71	4	212	161	161	20	15	73	75	82	179	162	149	114							
16	100	21	81	8	32	60	79	23	252	176	126	95	84	143	250	110	221	153	180	61	31	170	128				

Рис. 4. Зависимость значения поля «идентификатор длины» (3-й байт) от размера блока данных

Таким образом, в рамках разработанной модели примем, что размер поля «идентификатор длины» варьируется в пределах от двух до восьми бит:

$$L^{(дл)} \in \{2, \dots, 8\}. \quad (4)$$

В рамках модели вероятность того, что размер сегмента ПБРД $L_{j,v}^{(рк)}$ примет одно из возможных значений

$$L_{j,v}^{(рк)} \in \{L_1^{(рк)}, \dots, L_f^{(рк)}, \dots, L_F^{(рк)}, L_0^{(рк)}\}, \quad (5)$$

будем характеризовать матрицей финальных вероятностей

$$P_{L_{j,v}^{(c)}} = \begin{vmatrix} p_{L_1^{(c)}} & \dots & p_{L_f^{(c)}} & \dots & p_{L_F^{(c)}} & p_{L_0^{(c)}} \end{vmatrix}, \quad (6)$$

где $p_{L_f^{(c)}}$ – вероятность формирования кодером речевого кадра или кадра с параметрами комфортного шума размером $L_f^{(c)}$;

$L_f^{(c)}$ – f -й размер речевого кадра или кадра с параметрами комфортного шума из F возможных размеров;

$p_{L_0^{(c)}}$ – вероятность того, что в момент формирования ПБРД абонент молчит, $L_0^{(c)} = 0$.

В поле «адресная часть» указывается условный номер абонента-получателя речевого сообщения, который является уникальным на всем интервале передачи речевого сообщения в одном пакетном мультиплексном цифровом потоке:

$$\begin{cases} \Xi_{i,v} \neq \Xi_{j,s}, \text{ если } B_{i,v} \in B_g^{(сооб)} \text{ и } B_{j,s} \in B_h^{(сооб)} \\ \Xi_{i,v} = \Xi_{j,s}, \text{ если } B_{i,v} \text{ и } B_{j,s} \in B_g^{(сооб)} \end{cases}, \quad (7)$$

где $B_g^{(сооб)}$ – множество речевых кадров, кодирующих речевое сообщение g -го абонента;

$B_h^{(сооб)}$ – множество речевых кадров, кодирующих речевое сообщение h -го абонента;

$B_{i,v}$ – речевой кадр или кадр с параметрами комфортного шума в v -м сегменте i -го ПБРД;

$B_{j,s}$ – речевой кадр или кадр с параметрами комфортного шума в s -м сегменте j -го ПБРД;

$\Xi_{i,v}$ – значение поля «адресная часть» заголовка v -го сегмента i -го ПБРД;

$\Xi_{j,s}$ – значение поля «адресная часть» заголовка s -го сегмента j -го ПБРД.

Размер поля «адресная часть» $L^{(а)}$ выбирается производителем оборудования, исходя из возможностей оборудования, и должен удовлетворять следующему условию:

$$L^{(а)} > \log_2 m, \quad (8)$$

где m – максимальное число речевых сообщений, одновременно передаваемых в одном пакетном мультиплексном цифровом потоке, определяемое возможностями конкретного оборудования мультиплексирования.

Большинство современных образцов оборудования мультиплексирования речевых данных на прикладном уровне обеспечивает одновременную передачу от 32 до 256 речевых сообще-

ний различных абонентов. Таким образом, в рамках разработанной модели примем, что размер поля «адресная часть» варьируется в пределах от двух до восьми бит:

$$L^{(a)} \in \{2, \dots, 8\}. \quad (9)$$

В системах связи с коммутацией пакетов возникают ситуации, когда приемную сторону системы связи достигают не все переданные пакеты данных или когда отдельные пакеты получают задержку, превышающую $t_{\text{нкр}}$. Это происходит в результате перегрузок сети и приводит к нарушению порядка поступления пакетов на конечный узел приемной стороны. Для компенсации неравномерного поступления пакетов в системах передачи речи используют буфер, в котором накапливаются речевые данные, а воспроизведение осуществляется с задержкой [8]. В рекомендации [9] определено, что для поддержания минимально допустимого качества обслуживания абонентов задержка, получаемая речевым сигналом, не должна превышать 400 мс. Необходимо учитывать, что в ССС с космическими аппаратами на геостационарных орбитах минимальная задержка составит 240 мс. Поэтому, в данном случае, максимально допустимая величина вариации задержки пакетов не должна превышать 160 мс, а те пакеты, которые получают задержку, превышающую это значение, будут считаться «потерянными». Поле «номер по порядку» должно обеспечивать восстановление порядка следования блоков с речевыми данными, исходя из значения задержки 160 мс, и обнаруживать пакеты, получившие задержку, превышающую это значение. На практике задержка не превышает 300 мс. Исходя из того, что интервал следования блоков речевых данных составляет 20 мс, 300 мс соответствуют 15 интервалам $t_{\text{нкр}}$. Для кодирования 15 значений параметра достаточно четырех бит. Таким образом, с учетом того, что заголовок может иметь байт-ориентированные размеры структурных элементов, в рамках разработанной модели примем, что размер поля «номер по порядку» варьируется в пределах от четырех до восьми бит:

$$L^{(\text{нп})} \in \{4, \dots, 8\}. \quad (10)$$

Существуют различные варианты представления чисел в двоичном коде (например, прямой или инверсный код, двоичный или двоично-десятичный код, код Голея и т. п.). Порядок отображения порядковых номеров блоков речевых данных в десятичном коде можно представить как

$$\langle \varphi_{1,n}, \varphi_{2,n}, \dots, \varphi_{l,n}, \dots, \varphi_{L^{(\text{нп})},n} \rangle = Y^{(\text{нп})}(\Phi_n), \quad n = 1(1)N_{\text{нп}}, \quad \varphi_{l,n} \in \{0,1\}, \quad (11)$$

где Φ_n – n -е значение параметра Φ ;

$\varphi_{l,n}$ – l -й двоичный символ поля «номер по порядку» для n -го значения параметра Φ ;

$N_{\text{нп}}$ – цикл счета (число разных значений, которые принимает Φ_n);

$L^{(\text{нп})}$ – число двоичных символов поля «номер по порядку».

Применение детектора активности речи приводит к тому, что на интервалах, соответствующих паузам в речевом сообщении, формирование кадров с параметрами комфортного шума происходит только на каждом восьмом интервале $t_{\text{нкр}}$. При изменении шумовой обстановки этот интервал может не выдерживаться. Кроме того, переход от паузы к активной речи может произойти на любом интервале $t_{\text{нкр}}$. В указанных условиях информации о порядковом номере блока речевых данных недостаточно для восстановления речевого сообщения, приемная сторона должна получать информацию о моментах времени, в которые речевой кадр или кадр с параметрами комфортного шума должен быть декодирован. Такая информация передается в поле «метка времени». Так как блоки речевых данных могут формироваться только в моменты времени с дискретностью 20 мс, то для определения моментов времени для их декодирования достаточно передавать время в относительных единицах, соответ-

ствующих 20 мс. Задержка при передаче по каналам связи с коммутацией пакетов не превышает 300 мс, поэтому, как и в поле «номер по порядку», в поле «метка времени» достаточно передавать информацию о смещении всего на 15 интервалов. С учетом того, что заголовок может иметь байт-ориентированные размеры структурных элементов, в рамках разработанной модели примем, что размер поля «номер по порядку» варьируется в пределах от четырех до восьми бит:

$$L^{(MB)} \in \{4, \dots, 8\}. \quad (12)$$

Для кодирования моментов времени может использоваться любой двоичный код. Порядок отображения моментов времени формирования блоков речевых данных в десятичном коде можно представить как

$$\langle \tau_{1,n}, \tau_{2,n}, \dots, \tau_{l,n}, \dots, \tau_{L^{(MB)},n} \rangle = Y^{(MB)}(T_n), \quad n = 1(1)N_{MB}, \quad \tau_{l,n} \in \{0,1\}, \quad (13)$$

где T_n – n -е значение параметра T ;

$\tau_{l,n}$ – l -й двоичный символ поля «номер по порядку» для n -го значения параметра T ;

N_{MB} – цикл счета (число разных значений, которые принимает T_n);

$L^{(MB)}$ – число двоичных символов поля «метка времени».

ОЦЕНИВАНИЕ ТРЕБУЕМОЙ СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ РЕЧЕВЫХ ДАННЫХ АБОНЕНТОВ

Поток поступления и завершения телефонных вызовов от большой группы абонентов характеризуется отсутствием последствия, является ординарным, а при ограничении исследуемого промежутка времени одним часом и стационарным процессом, следовательно, его можно считать простейшим пуассоновским потоком с интенсивностью поступления вызовов λ [10]. Так как передача речевых сообщений должна осуществляться в реальном масштабе времени, то в тех случаях, когда все каналы системы связи заняты, абонент получает отказ в обслуживании. Тогда процесс изменения состояний рассматриваемой системы связи, определяемых числом одновременно передающихся речевых сообщений, можно рассматривать как марковский процесс рождения и гибели со счетным множеством состояний для m -канальной системы с экспоненциальными потоками вызовов и завершения обслуживания и отказами (в нотации Кендала – $M/M/m$) [11]. Для таких систем вероятность ρ_{V_j} того, что на r -интервале времени, равном $t_{нкp}$, по каналу связи передается $N_r^{(ar)}$ речевых сообщений характеризуется с помощью выражений:

$$\rho_{N_r^{(ar)}} = \begin{cases} \rho_0 \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^{V_r} \frac{1}{N_r^{(ar)}!}, & N_r^{(ar)} \leq m \\ 0, & N_r^{(ar)} > m \end{cases}, \quad (14)$$

$$\rho_0 = \left[\sum_{k=0}^{N_r^{(ar)}} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^k \frac{1}{k!} \right]^{-1}, \quad (15)$$

где λ – интенсивность потока поступления вызовов;

μ – интенсивность потока завершения вызовов;

$N_r^{(ar)}$ – число речевых сообщений, одновременно передаваемых локальной АТС на r -м интервале $t_{нкp}$;

m – максимальное число одновременно передаваемых речевых сообщений.

Число сегментов V_j , объединяемых в j -м ПБРД W_j речевых кадров и кадров с параметрами комфортного шума, носит случайный характер, так как зависит от интервала времени, в течение которого он формируется. Если канал связи свободен, то в ПБРД объединяются речевые кадры по одному от каждого абонента. В том случае, если размер формируемого ПБРД превысит максимально допустимый размер, определяемый протоколом более низкого уровня, то речевые данные могут быть переданы несколькими ПБРД меньшего размера разными IP-пакетами. При значительной нагрузке на канал передачи данных и незначительном числе одновременно передаваемых речевых сообщений в один ПБРД можно объединить по несколько речевых кадров и кадров с параметрами комфортного шума от каждого из абонентов. Такие различия в формировании ПБРД в разных условиях затрудняют модельное описание числа V_j , объединяемых речевых данных в j -й ПБРД. Так как модель разрабатывается для оценки требуемой средней скорости передачи данных на значительном временном интервале, то в рамках модели можно считать, что ПБРД формируется каждый интервал $t_{\text{нкp}}$, а $\rho_{N_r^{(\text{ar})}}$ равно доле ПБРД, которые формировались, когда в системе связи передавалось $N^{(\text{ar})}$ речевых сообщений, т. е. $V_j = N_j^{(\text{ar})}$.

С целью исследования требуемой скорости передачи данных при использовании протокола ПМРД и протокола RTP было произведено моделирование в среде Matlab при одинаковых исходных данных.

Для моделирования передачи по протоколу ПМРД использовалась разработанная модель, выражения (5), (6), (14), (15). Считалось, что IP-пакет с речевыми данными формируется каждый интервал $t_{\text{нкp}}$, при этом размер $L_j^{(\text{пПБРД})}$ j -го IP-пакета при пакетном мультиплексировании речевых данных абонентов определялся согласно выражению

$$L_j^{(\text{пПБРД})} = 224 + \sum_{v=1}^{V_j} (L_{j,v}^{(\text{пк})} + L^{(3)}). \quad (16)$$

Для моделирования передачи по протоколу RTP применялась модель, основанная на описании рекомендации RFC-3550 [4], выражения (5), (6), (14), (15). Считалось, что на интервале $t_{\text{нкp}}$ формируется V_j IP-пакетов, а их суммарный размер $L_j^{(\text{нRTP})}$ на j -м интервале $t_{\text{нкp}}$ определялся согласно выражению

$$L_j^{(\text{нRTP})} = \sum_{v=1}^{V_j} (320 + L_{j,v}^{(\text{пк})}). \quad (17)$$

В качестве исходных данных использовались следующие величины:

- $\mu = 30$ выз/ч, что соответствует средней продолжительности телефонного разговора 2 мин;
- $L_{j,v}^{(\text{пк})} \in \{104, 112, 128, 144, 152, 168, 208, 248, 320\}$, что соответствует размерам кадров, формируемых кодеком AMR-NB, размеру кадра с параметрами комфортного шума;
- матрица финальных вероятностей размера речевого кадра

$$P_{L_{j,v}^{(c)}} = |0,0625 \ 0,0625 \ 0,0625 \ 0,0625 \ 0,0625 \ 0,0625 \ 0,0625 \ 0,0625 \ 0,0625 \ 0,4375|,$$

которая задает равновероятное использование одной из восьми возможных скоростей НКР, вероятность молчания абонента составляет 0,5. При этом на каждые восемь интервалов $t_{\text{нкp}}$ в период паузы формируется кадр с параметрами комфортного шума.

На рис. 5 представлены результаты имитационного моделирования: гистограмма величины требуемой скорости R_{RTP} передачи канального уровня (величины формируемых за одну секунду данных на сетевом уровне) при использовании протокола RTP (рис. 5,а) и гистограмма величины требуемой скорости $R_{\text{ПМРД}}$ передачи канального уровня при использова-

нии протокола ПМРД. При этом величины формируемых за одну секунду данных на сетевом уровне определялись выражениями:

$$R_{\text{RTP}} = \sum_{j=1}^{J_c} L_j^{(\text{нRTP})}, \quad (18)$$

$$R_{\text{ПМРД}} = \sum_{j=1}^{J_c} L_j^{(\text{нПБРД})}, \quad (19)$$

где J_c – число формируемых за одну секунду кадров НКР через интервал $t_{\text{нкp}}$.

Из рис. 5 видно, что в одинаковых условиях (интенсивность поступления вызовов λ и размер заголовка $L^{(3)} = 12$ байт) при применении технологии ПМРД требуется более низкая скорость передачи данных на сетевом уровне, чем при передаче речевых сообщений с использованием протокола RTP.

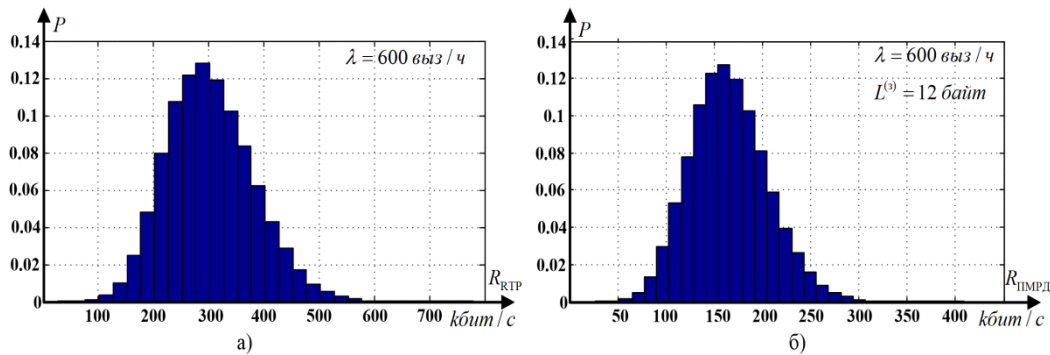


Рис. 5. Гистограмма вероятностей величины данных, формируемых за одну секунду на сетевом уровне:
а – с помощью протокола RTP; б – с помощью протокола пакетного мультиплексирования речевых данных на прикладном уровне

В качестве количественной оценки выигрыша от использования протокола пакетного мультиплексирования речевых данных на прикладном уровне, по сравнению с использованием протокола RTP, примем отношение математических ожиданий требуемых скоростей передачи данных на канальном уровне

$$G = \frac{M[R_{\text{RTP}}]}{M[R_{\text{ПМРД}}]}. \quad (20)$$

На рис. 6 представлено семейство кривых, показывающих величину выигрыша протокола мультиплексирования речевых данных по сравнению с протоколом RTP в зависимости от интенсивности поступления вызовов и размера добавляемого заголовка к блоку речевых данных.

Проведенные исследования показали, что применение ПМРД по сравнению с использованием протокола RTP позволяет сократить скорость передачи данных на сетевом уровне ЭМВОС, что, в свою очередь, позволяет повысить эффективность использования пропускной способности канала связи ССС. При этом чем выше интенсивность поступления вызовов от абонентов АТС и меньше добавляемый к блоку речевых данных заголовков в протоколе ПМРД, тем выше эффективность.

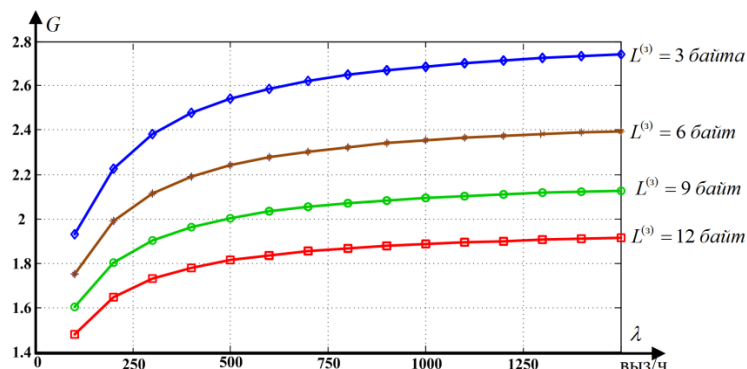


Рис. 6. Выигрыш протокола мультиплексирования речевых данных по сравнению с протоколом RTP в зависимости от интенсивности поступления вызовов и размера добавляемого заголовка к блоку речевых данных

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная модель ПБРД, в отличие от модели, базирующейся на известных принципах передачи мультимедийных данных [4], позволяет описывать мультиплексные цифровые потоки с речевыми данными абонентов, передаваемые по каналам ССС с коммутацией пакетов. Модель учитывает:

- изменение скорости низкоскоростного кодирования речи в процессе передачи речевого сообщения;
- динамическое размещение речевых данных от разных абонентов в структуре ПБРД;
- вариативность структуры сегментов в зависимости от конкретной реализации ПДРД.

Полученные с использованием модели данные позволяют оценивать требуемую скорость передачи данных на сетевом уровне ЭМВОС, что необходимо при разработке систем передачи данных.

Список используемых источников

1. Кукк К.И. Спутниковая связь: прошлое, настоящее, будущее. – М.: Горячая линия – Телеком, 2016. – 256 с.
2. Шелухин О.И., Лукьянцев Н.Ф. Цифровая обработка и передача речи / под ред. О.И. Шелухина. – М.: Радио и связь, 2000. – 456 с.
3. Дилип Н. Стандарты и протоколы Интернета: пер. с англ. – М.: Издательский отдел «Русская редакция» ТОО «Channel Trading Ltd.», 1999.
4. IETF RFC-3550 RTP: A Transport Protocol for Real-time Applications / Н. Schulzrinne, S. Casner, R. Frederick, V. Jacobson. – July 2003. – URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc3550> (дата обращения: 15.08.2019)
5. Новиков Е.А., Уткин Д.Р. Прогнозирование пользовательской нагрузки, поступающей на коммутационное оборудование земной станции военной сети спутниковой связи // III Всероссийская научно-практическая конференция. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. – Т. 2. – С. 378–382.
6. Ковальский А. А. Организация адаптивного мультиплексирования трафика мультисервисных сетей в каналообразующей аппаратуре земных станций спутниковой связи с учетом изменяющейся помеховой обстановки // Системы управления, связи и безопасности. – 2017. – № 1. – С. 175–212.

7. Manh-Cuong Nguyen Scheduling for Multi-users Multiplexing Radio Voice Transmission for enhancing voice capacity over LTE in PMR context / IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)/ – New Orleans. – 2015. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7127651/footnotes#footnotes> (дата обращения: 15.08.2019).

8. *Беллами Дж.* Цифровая телефония / пер. с англ. под ред. А.Н. Берлина, Ю.Н. Чернышова. – М.: Эко-Трендз, 2004.

9. ITU-T Recommendation G.114 One-way transmission time. – URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.114> (дата обращения: 15.08.2019)

10. *Лившиц Б.С., Пшеничников А.П., Харкевич А.Д.* Теория телетрафика: учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Связь, 1979. – 224 с.

11. *Клейнрок Л.* Теория массового обслуживания / пер. с англ. И.И. Грушко; ред. В.И. Нейман. – М.: Машиностроение, 1979. – 432 с.

А.В. Коцкович;
В.Ф. Суржиков,
кандидат техн. наук,
старший научный сотрудник

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ НАВИГАЦИОННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПРИ ПОЛЕТЕ К ЛУНЕ С ПОМОЩЬЮ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Рассматривается модель движения космического аппарата (КА) в системе Земля – Луна. Выведены уравнения движения КА во вращающейся системе координат относительно барицентра Земля – Луна. Показана схема полета КА к Луне. Проведена оценка возможности навигационного определения параметров движения КА при полете к Луне с помощью глобальных навигационных систем GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BEIDOU.

Ключевые слова: исследование Луны, космический аппарат, спутниковые навигационные системы, орбитальная группировка, зоны радиовидимости, система навигации космических аппаратов.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в Российской Федерации Президентом утверждена Федеральная космическая программа [1]. В рамках этой программы запланированы запуски космических аппаратов для освоения и изучения Луны. Полет космической станции «Луна-25» станет первой миссией после 45-летнего перерыва в исследовании Луны космическим аппаратом «Луна-24».

Одними из основных целей дальнейшего освоения и исследования Луны являются создание глобальной спутниковой навигационной системы Земля – Луна на основе действующих околоземных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС, GPS, Galileo и BEIDOU, дополненных околослунной сетью навигационно-связных аппаратов, а также строительство лунной обитаемой базы (полигона), добыча полезных ископаемых. На первом этапе лунных экспедиций необходимо создать околослунную пилотируемую орбитальную станцию.

УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ

В качестве модели движения КА, летящего к Луне, рассматривается задача трех тел в прямоугольной системе координат $SXYZ$ с началом координат в точке S . Движение всех трех тел происходит в одной системе координат (рис. 1). Подвижная система координат $Sxyz$ вращается с угловой скоростью ω вокруг оси CZ в неподвижной системе координат $SXYZ$. Начало координат располагается в барицентре S системы Земля – Луна. Ось z совпадает с Z в неподвижной системе координат. Подвижная ось x направлена к центру масс Луны и вращается вокруг точки S , как и Луна вокруг Земли. Ось y перпендикулярна оси x и образует правую декартову систему координат $Sxyz$. В этой модели используется безразмерная система единиц. Единицей длины считается расстояние от центра масс Земли до центра масс Луны, единицей массы – суммарная масса Земли M_3 и Луны M_L , а единицей времени – $T_{ЛЗ}/2\pi$, где $T_{ЛЗ}$ – орбитальный период движения Луны вокруг Земли. Массовый параметр составляет $\mu = M_L/(M_3 + M_L) \approx 0,01215$.

Для записи уравнений движения космического аппарата во вращающейся системе координат свяжем положение $\mathbf{R} = [X, Y, Z]$ и скорость $\mathbf{V} = [\dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z}]$ в инерциальной системе коор-

динат с положением $\mathbf{r} = [x, y, z]$ и скоростью $\mathbf{v} = [\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}]$ во вращающейся системе координат S_{xyz} :

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos t & -\sin t & 0 \\ \sin t & \cos t & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos t & -\sin t & 0 \\ \sin t & \cos t & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} - y \\ \dot{y} + x \\ \dot{z} \end{bmatrix}.$$

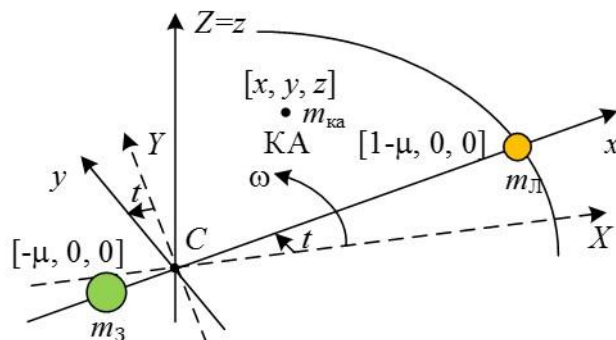


Рис. 1. Модель движения КА, летящего к Луне

Уравнения движения КА во вращающейся системе координат [2] представим в виде:

$$\begin{cases} \ddot{x} - 2\dot{y} = \Omega_x \\ \ddot{y} + 2\dot{x} = \Omega_y \\ \ddot{z} = \Omega_z \end{cases} \quad (1)$$

где

$$\Omega(x, y, z) = \frac{x^2 + y^2}{2} + \frac{1 - \mu}{r_1} + \frac{\mu}{r_2}$$

и Ω_x , Ω_y и Ω_z – частные производные по координатам x , y , z соответственно функции $\Omega(x, y, z)$, а расстояния от КА до центров масс Земли и Луны вычисляются следующим образом:

$$r_1 = \sqrt{(x + \mu)^2 + y^2 + z^2},$$

$$r_2 = \sqrt{(x - 1 + \mu)^2 + y^2 + z^2}.$$

Используя уравнения (1), можно определить пять положений равновесия (рис. 2). Несложно видеть, что эти положения находятся в одной плоскости S_{xy} . Обозначим полученные положения равновесия символами L_1, L_2, L_3, L_4 и L_5 . Это точки либрации. Коллинеарные точки либрации L_1, L_2 и L_3 расположены на оси Ox . Соответственно, точки L_4 и L_5 располагаются в вершинах равносторонних треугольников с общим основанием M_3 – $M_{\text{Л}}$. Эти точки называются треугольными точками либрации. По теореме Ляпунова коллинеарные точки либрации L_1, L_2, L_3 являются нестабильными при любых значениях $\mu \in (0, 1)$, т. е. в любой системе трех тел. Для треугольных точек либрации L_4 и L_5 в системе Земля – Луна они являются стабильными, согласно теореме Ляпунова, практически для всех начальных условий [2]. Особенности перемещения КА в областях лагранжевых точек либрации Луны рассмотрены во многих работах [2–4].

При проектировании полета КА к Луне по кратчайшей схеме необходимо учитывать влияние точек либрации на траекторию движения КА и выбирать эту траекторию таким образом, чтобы влияние это было минимальным.

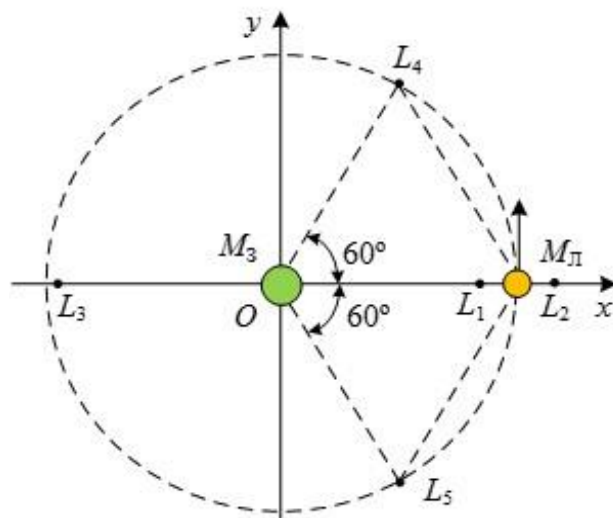


Рис. 2. Точки либрации в системе Земля – Луна

ОЦЕНИВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ НАВИГАЦИОННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ КА ПРИ ПОЛЕТЕ К ЛУНЕ С ПОМОЩЬЮ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Траектория полета КА к Луне состоит из ряда этапов: выведение КА на промежуточную орбиту, включение двигателя и маневрирование в сторону полета к Луне, торможение у Луны и выход на орбиту искусственного спутника Луны (ИСЛ). Одна из схем такого перелета с мягкой посадкой на Луне представлена на рис. 3.

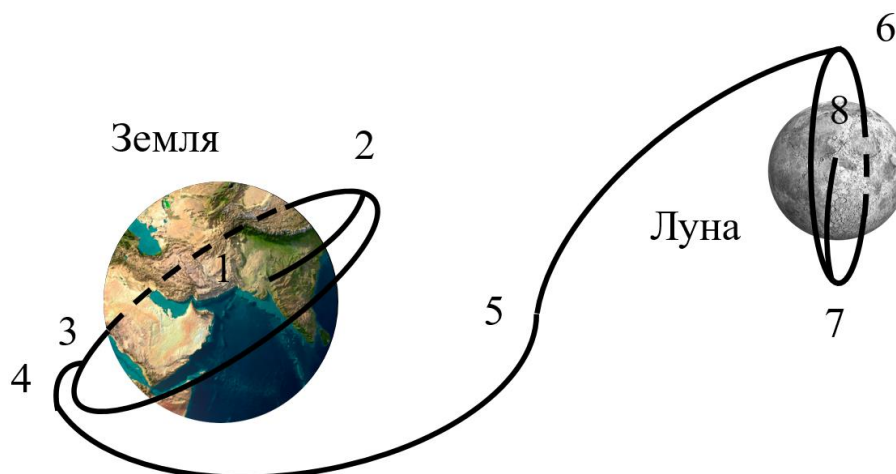


Рис. 3. Схема траектории полета КА на Луну

Количество и содержание этапов полета зависят от решаемой задачи и схемы полета [5]. Выведение КА на траекторию полета к Луне осуществляется с помощью ракеты-носителя и разгонного блока. Три ступени ракеты-носителя обеспечивают выведение космической головной части, состоящей из разгонного блока и КА, на околоземную круговую орбиту высотой порядка 200 км (этапы 1-2 и 2-3 на рис. 3).

С помощью одного включения двигателя разгонного блока КА переводится на траекторию полета к Луне (этапы 3-4 и 4-5). Затем с помощью тормозящего импульса КА переводится на окололунную орбиту [около 100 км (этапы 5-6 и 6-7)].

Траекторные измерения осуществляются на окололунной орбите ИСЛ. По их результатам рассчитываются параметры движения КА, определяется и вносится соответствующая коррекция. Все это делается с целью обеспечения процесса посадки в заданную область Луны (этап 7-8).

В настоящее время в космосе работают глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) ГЛОНАСС, GPS, Galileo, BEIDOU. Задача применения технологии систем навигационных космических аппаратов (НКА) совместно с бортовыми системами навигации околоземных и геостационарных КА является актуальной.

Орбитальная группировка ГЛОНАСС состоит из 24 активно работающих КА, расположенных в трех равномерно удаленных орбитальных плоскостях, развернутых через 120° . На каждой орбите системы ГЛОНАСС располагаются по восемь КА.

КА системы GPS расположены в шести орбитальных плоскостях через 60° по долготе восходящего узла. На орбитах системы GPS находятся по четыре КА, равноудаленных друг от друга.

Орбитальные группировки Galileo и BEIDOU расположены в трех плоскостях. Кроме того, пять КА в BEIDOU при создании полной группировки будут расположены на геостационарной орбите (ГСО). Орбитальные параметры спутниковых навигационных систем приведены в табл. 1.

Таблица 1

Орбитальные параметры ГНСС

Параметр	GPS	ГЛОНАСС	Galileo	BEIDOU
Число НКА в системе	24	24	30	36 (5 ГСО)
Число орбитальных плоскостей	6	3	3	3
Наклонение орбиты i	55°	$64,7^\circ$	56°	55°
Период обращения по орбите T	11 ч 58 мин 00 с	11 ч 15 мин 44 с	14 ч	12 ч 53 мин 24 с
Высота полета НКА, км	20180	19130	23222	21528

Орбиты всех космических аппаратов ГНСС практически круговые.

На рис. 4 представлены орбиты навигационных спутниковых систем в одной плоскости и показана диаграмма передающей GPS антенны, направленная на КА, летящий к Луне.

Максимальное излучение всех передающих антенн НКА направлено к центру Земли, а диаграмма направленности антенн каждой из систем имеет свое значение. Так, для НКА системы GPS излучение сигнала по мощности происходит в пределах конуса с углом раствора $\pm 23,5^\circ$. Тогда высота образующих конуса над поверхностью Земли определяется по формуле

$$H = (R_3 + h) \sin \theta - R_3, \quad (2)$$

где R_3 – средний радиус Земли, $R_3 = 6371$ км;

h – высота орбиты НКА;

θ – угол, составляющий половину луча главного лепестка диаграммы передающей антенны навигационного спутника.

Тогда, подставляя значения величин, получим высоту образующих конуса над поверхностью Земли для GPS, равную 4200 км.

Для ГЛОНАСС указанная величина, рассчитанная по формуле (2), равна около 2000 км, так как высота орбиты меньше и диаграммы направленности передающей антенны на уровне половинной мощности составляют $\pm 19^\circ$.

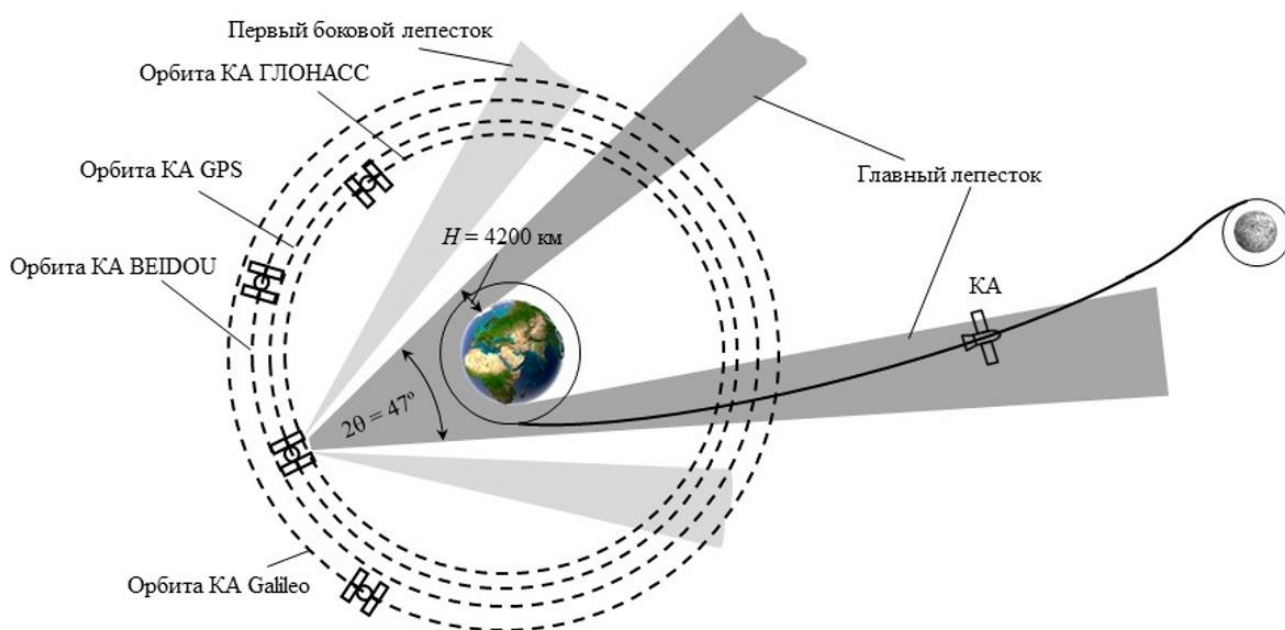


Рис. 4. Орбиты навигационных спутниковых систем

Созданные методы, алгоритмы и программы бортовой навигационной системы для околоземных КА [6] позволяют проводить определение параметров движения по сигналам ГНСС ГЛОНАСС, GPS, Galileo и BEIDOU как на околоземных, так и на геостационарных орбитах. Таким образом, ГНСС позволяют обеспечивать навигационно-баллистическое сопровождение полетов КА к Луне. На рис. 5 представлены взаимные расположения НКА и КА при полете к Луне для одной из плоскостей орбит ГНСС ГЛОНАСС.

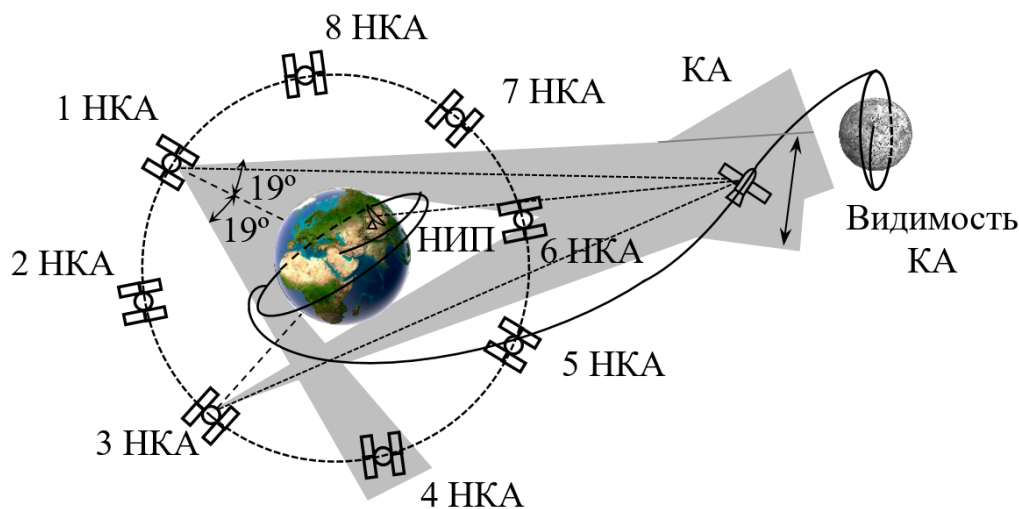


Рис. 5. Взаимные расположения НКА и КА при полете к Луне

Таким образом, сигналы НКА образуют непрерывное навигационное поле как на поверхности Земли, так и на высотах до 2000 км. Часть сигналов от НКА экранируется Землей и образует за ней разрывное навигационное поле, имеющее структуру пересекающихся кольцевых полос, поскольку в этом случае НКА и КА располагаются по разные стороны Земли. Длительность и количество сеансов радионавигации зависят от ширины этих полос и в частности от коэффициентов усиления приемных антенн и чувствительности используемого ГНСС – приемника.

Основной режим навигационных определений большинства потребителей относится к непрерывному навигационному полю, т. е. предполагает возможность проведения в любой момент времени измерений псевдодальности и радиальной псевдоскорости как минимум до четырех или более НКА и возможность определения координат и скорости движения потребителя практически в реальном времени.

Для КА, движущихся к Луне, условие непрерывности навигационного поля не выполняется, и количество наблюдаемых (видимых) НКА при значительном удалении от Земли ограничено конусом радиовидимости. В частности, для момента времени, представленного на рис. 5, видимых НКА будет два (1 НКА и 3 НКА). Кроме того, средствами наземного комплекса управления научно-измерительных пунктов (НИП) производится угловое сопровождение КА в полете к Луне, проводятся траекторные измерения и контроль работы всех технических средств КА. При маневрировании КА на его борт закладывается командно-программная информация.

Таким образом, анализ условий радиовидимости НКА космическими аппаратами дальнего космоса показывает, что из-за разрывного навигационного поля отсутствует возможность непрерывной навигации. При этом вероятность навигации по четырем НКА для КА, летящих к Луне, мала. Обычно видны 2-3 НКА с учетом всех плоскостей орбит ГНСС ГЛОНАСС, GPS, Galileo и BEIDOU.

Затенение ионосферой необходимо также учитывать, как мы учитываем затенение Землей. Это объясняется тем, что сигналы, которые распространяются у поверхности Земли, испытывают влияние слоя ионосферы значительно большее по сравнению с сигналами, которые распространяются по трассе «НКА – потребитель». Это происходит из-за наличия расстояния, которое проходят сигналы от НКА к КА. В частности, при движении по касательной к поверхности Земли сигналы проходят больший путь через ионосферу. Поскольку одночастотный приемник не имеет возможности компенсировать ионосферную погрешность, возможно правильно было бы не обрабатывать сигналы, проходящие у поверхности Земли, где значительна концентрация электронов. В то же время, решая навигационную задачу, имеет смысл считать сигналы, не затененные Землей и ионосферой. С учетом указанных выше ограничений зона видимости НКА для КА дальнего космоса есть узкое кольцо. Диапазон углов восхождения (ширина зоны видимости) видимых НКА приблизительно 2° , что соответствует области 80° по шкале углов восхождения.

Для баллистико-навигационного обеспечения полетов КА к Луне используются системы навигации самих КА. Здесь предпочтение отдается системам, которые могут принимать сигналы от нескольких навигационных спутников различных систем. Это обеспечивает лучшую надежность их работы.

Если в качестве бортового оборудования КА использовать системы навигации, то в этом случае мы сможем:

- осуществлять оперативный контроль маневрирования КА;
- определять параметры движения КА в реальном масштабе времени;
- обеспечивать КА стабильной сеткой частот и времени;
- сократить траекторные измерения наземными средствами (можно ограничиться измерениями только в процессе испытаний и в случае наличия нештатных ситуаций).

ВЫВОДЫ

1. Показана возможность использования ГНСС ГЛОНАСС, GPS, Galileo и BEIDOU для обеспечения навигации не только в ближней операционной космической зоне, но и при полетах в дальнем космосе.

2. Проведены предельные оценки видимого числа навигационных КА при полете к Луне. При этом в КА должны использоваться системы навигации самих КА, что обеспечивает

поиск и слежение за сигналами навигационных систем и дает возможность измерять параметры движения КА.

Список используемых источников

1. Основные положения основ государственной политики Российской Федерации в области космической деятельности на период до 2030 года и дальнейшую перспективу: утв. Президентом РФ от 19.04 2013 года № Пр-906/. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_145908 (дата обращения: 14.11.2019).

2. *Маркеев А.П.* Точки либрации в небесной механике и космодинамике. – М.: Наука, 1978. – 312 с.

3. *Аверкиев Н.Ф., Васьков С.А., Салов В.В.* Баллистическое построение систем космических аппаратов связи и пассивной локации лунной поверхности // Изв. вузов. Приборостроение. – 2008. – Т. 51, № 12. – С. 66–72.

4. *Ильин И.С., Тучин А.Г.* Квазипериодические орбиты в окрестности точки либрации L_1 системы Солнце–Земля // Препринты ИПМ имени М.В. Келдыша. – 2016. – № 006. – С. 1–30.

5. *Мамон П.А., Салов В.В.* Динамика полета к Луне: моногр. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2009. – 137 с.

6. Автономная навигационная система околоземного космического аппарата / Э.Л. Аким, А.П. Астахов, Р.В. Бакитько и др. // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2009. – № 2. – С. 139–158.

А.П. Доронин,
доктор техн. наук, профессор;
А.В. Новиков,
кандидат техн. наук;
А.С. Тимошук,
кандидат техн. наук

ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ ОРГАНИЗАЦИИ ВЕДОМСТВЕННОЙ СЕТИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА МИНИСТЕРСТВА ОБОРОНЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

В статье рассмотрены проблемные вопросы организации ведомственной сети экологического мониторинга Министерства обороны Российской Федерации. Показано, что взаимодействие по вопросам экологического мониторинга (ЭМ) службы (экологической безопасности) Вооруженных Сил Российской Федерации (ВС РФ) с Гидрометеорологической службой (ГМС) ВС РФ с использованием для этих целей ее наблюдательной сети может существенно снизить затраты на проведение ЭМ, а также повысить его качество и оперативность в войсках (силах).

Ключевые слова: экологический мониторинг, служба (экологической безопасности), технические средства, окружающая среда, ведомственная сеть экологического мониторинга.

ВВЕДЕНИЕ

В современном обществе постоянно растет внимание к вопросам, связанным с состоянием окружающей среды. Пришло осознание того, что без системного подхода к решению глобальных экологических проблем и активных действий в этой области современный мир могут ждать губительные изменения в биосфере уже в нашем веке. Понимание сложившейся обстановки произошло на всех уровнях общества: от простых граждан до глав государств и международных организаций.

Не стало исключением и наше государство. Так, 21 сентября 2019 года Правительством Российской Федерации было ратифицировано Парижское соглашение по климату, подписанное 22 апреля 2016 года [1]. С принятием этого документа наше государство взяло дополнительные обязательства в области борьбы с изменением климата, охраны окружающей среды, мониторинга ее состояния. Данное обстоятельство потребовало развития всех систем охраны и мониторинга окружающей среды государства и, в частности, системы экологического мониторинга Министерства обороны Российской Федерации как обособленной ее составляющей, имеющей свою специфику, связанную с военной деятельностью.

В соответствии с приказом Министра обороны Российской Федерации (МО РФ) от 14 сентября 2015 года № 530 «Об утверждении Положения об органах экологической безопасности Вооруженных Сил Российской Федерации» [2], одной из задач службы (экологической безопасности) ВС РФ являются организация и осуществление экологического мониторинга и экологического контроля параметров окружающей среды. Однако в настоящее время отсутствуют необходимые технические средства, наблюдательные посты, обслуживающий персонал, информационные каналы и финансирование, позволяющие в полной мере выполнять данную задачу. В связи с этим весьма актуальной стала задача оптимизации требуемого количества технических средств экологического мониторинга военных объектов и создания эффективной ведомственной наблюдательной сети для получения достоверной, оперативной и полной информации о состоянии окружающей среды на объектах Министерства обороны.

Необходимость развития в ВС РФ собственной ведомственной сети ЭМ обусловлена тем, что они являются самостоятельной государственной структурой, деятельность которой в силу своего предназначения связана с риском вредных воздействий на окружающую сре-

ду (ОС), а также во многом зависит от ее состояния. Влияние деятельности войск и сил флота на окружающую среду разнообразно, а иногда уникально по факторам воздействия и характеру проявления. Разнообразный характер взаимодействия военных объектов с ОС требует комплексного подхода к развитию ведомственной системы экологического мониторинга ВС РФ, ее технического и нормативно-правового обеспечения. Это наглядно подтвердил опыт боевых действий в Сирийской Арабской Республике [3], где и сейчас остро стоит вопрос мониторинга состояния окружающей среды, особенно в условиях возможности применения боевиками запрещенных методов и средств ведения войны, преднамеренного разрушения экологически опасных объектов, уничтожения природных объектов для достижения военного преимущества.

НОРМАТИВНО-ПРАВОВОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ОБЪЕКТОВ ВС РФ

Основными нормативно-правовыми актами в области обеспечения экологической безопасности и экологического мониторинга в ВС РФ являются:

- Приказ МО РФ 2015 г. № 530 «Об утверждении Положения об органах экологической безопасности Вооруженных Сил Российской Федерации» [2];
- Приказ МО РФ 2014 г. № 333 «Об утверждении Руководства по войсковому (корабельному) хозяйству в Вооруженных Силах Российской Федерации» [4];
- Правила охраны природной среды в Военно-Морском Флоте (ПОПС-90), утвержденные приказом ГК ВМФ 1990 г. № 320 [5].

В соответствии с перечисленными документами в современной структуре организации обеспечения экологической безопасности войск (сил) на уровне округа (рис. 1) задачи по осуществлению экологического мониторинга возлагаются на экологические службы округов и региональные экологические центры (РЭЦ) [2].



Рис. 1. Организационная структура Службы (экологической безопасности) ВС РФ

Нормативно-правовое обеспечение ЭМ объектов ВС РФ неразрывно связано с организацией его ведомственной сети, что также порождает ряд проблемных вопросов, обуславливающих

ющих необходимость проведения самостоятельных исследований. Результаты исследований, выполненных авторами, представлены ниже.

ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ ОРГАНИЗАЦИИ ВЕДОМСТВЕННОЙ СЕТИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Одними из серьезнейших проблем при развертывании сети экологического мониторинга в ВС РФ являются недостаток технических средств, отсутствие собственной сети наблюдательных постов ЭМ, автоматизированных средств сбора, обработки и передачи информации по режимным и нережимным каналам связи Министерства обороны ВС РФ. Таким образом, налицо противоречие между необходимостью проведения экологического мониторинга в ВС РФ и отсутствием возможности его организации существующими силами и средствами, имеющимися на данный момент в распоряжении Службы (экологической безопасности) ВС РФ [6, 7].

Решение данной проблемы путем разворачивания новой сети ведомственного ЭМ и насыщения ее техническими средствами и личным составом представляется высоко затратным, трудноосуществимым и длительным мероприятием. Поэтому при проектировании сети ведомственного ЭМ предлагается воспользоваться опытом создания Единой государственной системы экологического мониторинга (ЕГСЭМ). Начало ее созданию было положено в 70-х годах, когда в СССР была организована Общегосударственная служба наблюдений и контроля за уровнем загрязнения внешней среды [8]. Она функционировала на базе органов Госкомгидромета и ряда других министерств и ведомств. На базе правопреемницы этой службы (Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды) и сейчас осуществляются наблюдения за уровнем загрязнения атмосферы, водных объектов, почвы, биоты и проводятся сопутствующие гидрометеорологические наблюдения на территории Российской Федерации, за исключением территорий военных объектов. Современная структура Единой государственной системы ЭМ РФ показана на рис.2.

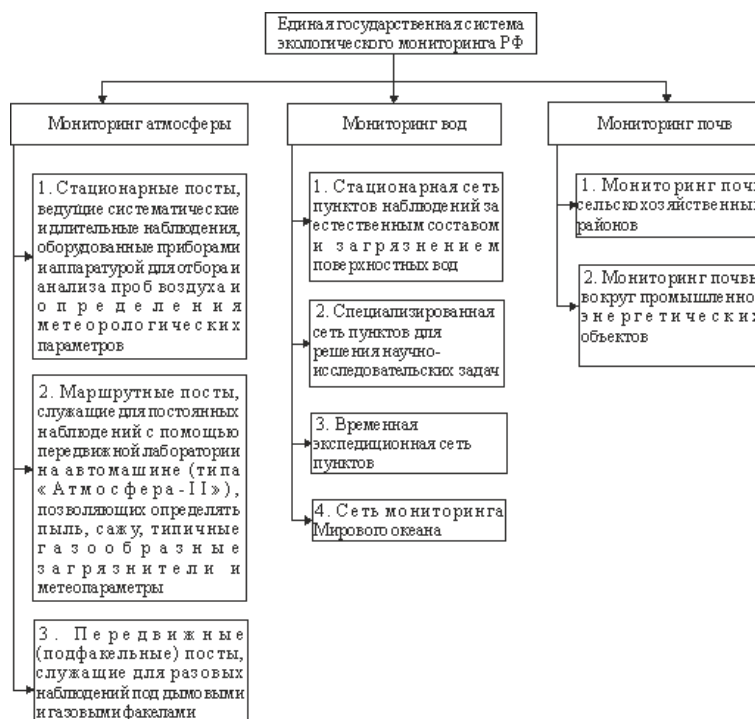


Рис. 2. Структура Единой государственной системы экологического мониторинга РФ

На основе анализа задач и структуры Единой государственной системы экологического мониторинга РФ, реализованной в основном на базе Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, можно сделать вывод, что при решении подобных задач в ВС РФ целесообразно возложить эти функции на выполняющую подобные задачи службу в Министерстве обороны РФ – Гидрометеорологическую службу ВС РФ (ГМС ВС РФ) [8].

Под ГМС ВС РФ понимают совокупность сил и средств, предназначенных для гидрометеорологического обеспечения войск (сил) в мирное и военное время, включающих в себя гидрометеорологические подразделения видов и родов войск Вооруженных Сил Российской Федерации, расположенные по всей территории Российской Федерации в местах дислокации соединений и частей ВС РФ.

ГМС ВС РФ решает задачи, во многом схожие с задачами Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, в том числе проведение регулярных метеорологических, гидрометеорологических, аэрологических, гидрологических наблюдений на гидрометеорологических (метеорологических) станциях и постах гидрометеорологических (метеорологических) подразделений и частей, включающих в себя метеорологическую, авиаметеорологическую, аэрологическую, морскую гидрометеорологическую, береговую гидрологическую, морскую корабельную (судовую) сети.

Гидрометеорологические станции и посты ГМС ВС РФ размещаются так, чтобы обеспечивалась необходимая точность интерполяции значений гидрометеорологических величин для пунктов дислокации частей и подразделений, в которых отсутствуют гидрометеорологические станции и посты. Наблюдения на сети станций и постов ГМС ВС РФ осуществляются по единой программе, в одно и то же время одинаковыми техническими средствами. Полученная гидрометеорологическая информация анализируется, и на основе ее анализа разрабатываются прогнозы различной заблаговременности, которые в дальнейшем доводятся до потребителей информации.

ПУТИ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМНЫХ ВОПРОСОВ ОРГАНИЗАЦИИ ВЕДОМСТВЕННОЙ СЕТИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Одними из первых шагов для решения проблемных вопросов организации ведомственной сети экологического мониторинга представляется дальнейшее проведение научно-исследовательских работ в области обоснования внешнего облика системы экологического мониторинга и контроля в ВС РФ (продолжение проводимых в академии в последние годы НИР по экологической тематике «Морошка», «Жимолость», «Ягель», с последующим выходом на опытно-конструкторские работы). Необходимы совершенствование нормативно-правового и методического обеспечения работ по экологическому мониторингу и контролю в войсках (силах), а также организация взаимодействия по вопросам экологического мониторинга между Службой (экологической безопасности) и ГМС ВС РФ, с использованием для указанных целей ее развитой наблюдательной сети, технических возможностей, научно-образовательного потенциала. Для этого рекомендуется применять передовой опыт академии по разработке автоматизированного рабочего места военного гидрометеоролога, а также использовать результаты научно-исследовательской работы «Экос-2» по созданию системы экологического мониторинга космодрома Восточный, разработки академии в области аэрокосмических технологий дистанционного зондирования. Реализация научно обоснованного подхода к данной проблеме может существенно снизить затраты, повысить качество и оперативность проведения экологического мониторинга и контроля в войсках (силах).

Список используемых источников

1. О принятии Парижского соглашения: постановление Правительства Российской Федерации от 21 сентября 2019 года №1228. – URL: <http://www.government.ru/docs/37917.html> (дата обращения: 12.09.2019).
2. Об утверждении Положения об органах экологической безопасности Вооруженных Сил Российской Федерации: приказ Министра обороны Российской Федерации 2015 г. № 530. – URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?reg=home#doc/EXP/683582.html> (дата обращения: 12.09.2019)
3. Вооруженные Силы в Сирии: Специальная операция. Вооружение и военная техника: научно-популярный труд. – АО «Красная Звезда», 2019. – 384 с.
4. Об утверждении Руководства по войсковому (корабельному) хозяйству в Вооруженных Силах Российской Федерации: приказ Министра обороны Российской Федерации 2014 г. № 333. – URL: <http://www.base.garant.ru/70747768.html> (дата обращения: 12.09.2019)
5. Правила охраны природной среды в Военно-Морском Флоте (ПОПС-90): утв. приказом ГК ВМФ 1990 г. № 320. – URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?reg=home#doc/ESU/47332/100008/0.html> (дата обращения: 12.09.2019)
6. Экологическая безопасность войск в полевых условиях / И.А. Готюр, А.С. Тимощук, А.В. Новиков, П.В. Шабалин // Армейский сборник. – РИЦ «Красная звезда» Минобороны России, 2018. – №7. – С.69–72.
7. Формирование эффективной системы управления обеспечением экологической безопасности деятельности Вооруженных Сил Российской Федерации / Ю.А. Летучий, А.В. Новиков, А.С. Тимощук, П.В. Шабалин // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2018. – Вып. 661. – С.74–81.
8. Предложения по созданию ведомственной сети экологического мониторинга на базе Гидрометеорологической службы ВС РФ / А.С. Тимощук, А.В. Новиков, А.Б. Маков, А.А. Борисов // Труды II Всероссийской научной конференции «Экология и космос» имени академика К.Я. Кондратьева. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2015. – С. 456–461.

А.П. Доронин,
доктор техн. наук, профессор;
Н.А. Козлова;
В.М. Петроченко,
кандидат техн. наук, доцент

ОЦЕНКИ ПРИГОДНОСТИ ПЕРЕОХЛАЖДЕННОЙ ОБЛАЧНОСТИ К РАССЕЙАНИЮ НАД ЦЕНТРАЛЬНЫМ РАЙОНОМ ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ В ИНТЕРЕСАХ РЕШЕНИЯ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ

На основе обработки материалов самолетного зондирования атмосферы над Москвой приводятся количественные оценки пригодности переохлажденных волнистообразных, слоистообразных и конвективных облаков к воздействию над Центральным районом Европейской территории России. Полученные данные могут использоваться при планировании, подготовке и проведении мероприятий по воздействию на облака указанных форм с целью рассеяния облачного покрова в интересах решения широкого круга прикладных задач.

Ключевые слова: переохлажденные волнистообразные, слоистообразные и конвективные облака, облачность, воздействие (модифицирование), пригодность облаков к рассеянию.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в России отмечается рост (на 6–7% в год) опасных явлений погоды, нередко приводящих к гибели людей и наносящих ущерб экономике страны, оцениваемый в среднем около 1% внутреннего валового продукта [1]. Ежегодно в Российской Федерации фиксируется 400–500 чрезвычайных ситуаций, связанных с опасными явлениями погоды [2].

Среди неблагоприятных погодных явлений особое место занимают облака, с которыми связаны такие опасные явления погоды, как низкая облачность, град, гроза, сильные осадки в виде дождя и снега, паводка, наводнения и другие, наносящие большой материальный ущерб. Поэтому актуальной является задача по поиску и практическому внедрению методов и средств, позволяющих устранить или в значительной мере снизить негативное влияние на хозяйственную деятельность человека опасных явлений погоды, связанных с облаками различных форм. В последние десятилетия для этих целей все чаще стали применяться методы и средства воздействия на атмосферные процессы и явления и прежде всего на переохлажденные облака и туманы [3].

Наличие в нашей стране значительного количества методов [4], технических средств [5] воздействия на переохлажденные облака, а также методик засева облаков различных форм с определенными целями [6, 7] обуславливает необходимость проведения исследований по оцениванию ресурсов облачности применительно к данной проблеме в интересах решения широкого круга прикладных задач. Поэтому целью настоящей работы является оценивание ресурсов облачности над Центральным районом Европейской территории России в задачах активных воздействий. Выбор этого района в качестве исследуемого обусловлен следующими обстоятельствами:

– во-первых, в этом районе находится самый большой мегаполис России, Москва, со свойственным ему большим количеством различного рода проблем (загрязнение атмосферного воздуха, аварии на экологически опасных объектах и др.);

– во-вторых, этот район является в России важным центром по производству сельскохозяйственной и животноводческой продукции, производство которой во многом определяется благоприятными погодными условиями;

– в-третьих, в последние десятилетия существенно увеличилось число опасных явлений погоды, связанных с облаками различных форм и наносящих экономике данного района существенный материальный ущерб;

– в-четвертых, в данном районе находятся сразу несколько самых крупных в стране аэропортов (Шереметьево, Внуково, Домодедово), регулярность полетов самолетов в которых в значительной мере зависит от характеристик облачности (высота нижней границы облаков, осадки в виде дождя и снега, обледенение в облаках и др.).

Наконец, выбор Центрального района в качестве исследуемого связан с отсутствием в научной литературе сведений о количественных оценках пригодности переохлажденных облаков различных форм к воздействию с определенными целями для этого района.

ХАРАКТЕРИСТИКА ИСХОДНОГО МАТЕРИАЛА И МЕТОДИКА ЕГО ОБРАБОТКИ

Основой для выполнения настоящей работы явились материалы самолетного зондирования атмосферы ТАЭ-7.7м (5870 подъемов самолетов-зондировщиков) над Москвой за период 1953–1964 годов. Выбор данного исходного материала за указанный период обусловлен тем, что именно в это время в нашей стране проводилось регулярное самолетное зондирование атмосферы (2 раза в сутки на 28 станциях страны) для получения конкретных характеристик облаков различных форм (в том числе и тех, которые определяют возможность воздействия на них) в определенных физико-географических районах. Следует отметить, что самые точные и надежные характеристики облаков (например, температурные, геометрические, микрофизические) могут быть получены лишь с помощью самолетного зондирования. Никакими другими способами (в частности, аэрологическими, радиолокационными, космическими) невозможно достичь такую высокую точность измерения характеристик облаков [8].

Самолетное зондирование атмосферы осуществлялось в нашей стране главным образом в период с 1953 по 1967 год. В последующие годы оно больше не проводилось и до настоящего времени не возобновлялось. Исходя из этого представляется возможным использование данных тех лет для проведения исследований с целью получения оценок, характеризующих пригодность переохлажденных облаков различных форм к воздействию с конкретными целями над выбранным в работе районом.

Согласно проведенным к настоящему времени исследованиям пространственной изменчивости характеристик облаков (в частности, волнистообразных и слоистообразных) [9], представляется возможным полагать, что полученные для района Москвы данные могут считаться репрезентативными и в целом для Центрального района Европейской территории России. Как отмечается в работе [9], характеристики облаков, полученные в одном пункте, вполне могут быть применимы и к площадям порядка десятков тысяч квадратных километров без существенных временных изменений. Это связано с тем, что на таких площадях эффекты анизотропности и неоднородности структуры облачных полей могут не учитываться [10]. Следовательно, можно полагать, что характеристики облачности, полученные для одного конкретного пункта, над которым располагается центральная часть облачного массива, могут считаться репрезентативными и показательными для всего рассматриваемого в работе района.

К волнистообразным облакам в работе отнесены сплошные одно- и многослойные слоистые и слоисто-кучевые облака. Они наблюдаются как отдельно (самостоятельно), так и в сочетании с высоко-кучевыми облаками.

При рассмотрении слоистообразных облаков в работе они подразделялись на два класса. К первому из них были отнесены слоисто-дождевые облака, которые наблюдались как отдельно (самостоятельно), так и в сочетании с другими формами облаков, включая и высоко-слоистые. Ко второму классу были отнесены высоко-слоистые облака, которые наблюдались

как отдельно (самостоятельно), так и в сочетании с другими формами облаков (исключая слоисто-дождевые) [11].

В результате обработки материалов самолетного зондирования атмосферы над аэропортом Внуково в статье приведены количественные оценки пригодности переохлажденных волнистообразных и слоистообразных облаков к рассеянию над Центральным районом в течение зимы (декабрь – февраль) и в месяцы холодного полугодия (ноябрь – март), а также в целом за этот период. Приведенные в настоящей статье количественные оценки пригодности к рассеянию конвективных облаков для рассматриваемого района относятся к месяцам теплого полугодия (апрель – сентябрь) и в целом за полугодие.

ОЦЕНКИ ПРИГОДНОСТИ ПЕРЕОХЛАЖДЕННОЙ ОБЛАЧНОСТИ К ВОЗДЕЙСТВИЮ НАД ЦЕНТРАЛЬНЫМ РАЙОНОМ ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ В ИНТЕРЕСАХ РЕШЕНИЯ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ

Выбор в настоящей работе в качестве объекта воздействия переохлажденной облачности обусловлен тем фактом, что на современном этапе наиболее разработанными и внедренными на практике являются методы и средства модифицирования именно переохлажденных атмосферных облачных образований. В качестве переохлажденной облачности рассматривается совокупность волнистообразных (только слоистых и слоисто-кучевых), слоистообразных (только слоисто-дождевых и высоко-слоистых) и конвективных (только мощно-кучевых) облаков, наблюдающихся над рассматриваемым районом.

Проведение работ по воздействию на переохлажденные облачные системы неразрывно связано с исследованием вопроса о повторяемости пригодных к засеву облаков различных форм с определенной целью в конкретном физико-географическом районе. Такие исследования позволяют провести оценку облачных ресурсов по воздействию с целью вызывания искусственных осадков или интенсифицирования естественных осадков, рассеяния или стабилизации облачного покрова, а также они позволяют обосновать необходимость и целесообразность проведения подобных мероприятий. В связи с этим в статье приводятся оценки пригодности к засеву переохлажденных волнистообразных, слоистообразных и конвективных облаков над Центральным районом Европейской территории России с целью их рассеяния.

При получении оценок пригодности переохлажденных волнистообразных, слоистообразных и конвективных облаков в работе использованы критерии, сформированные в результате проведения многочисленных натуральных экспериментов [5, 12–14]. Так, характеристики переохлажденных волнистообразных и слоистообразных облаков, определяющих возможность их рассеяния, должны удовлетворять следующим критериям [12, 13]:

- толщина облаков – не более 1000 м;
- фазовая структура – капельная или смешанная;
- средняя температура облачного слоя – не выше минус 3°C.

В случае воздействия на конвективные облака с целью их разрушения единственным критерием является их мощность, которая не должна превышать значения, составляющего 4–5 км. Это обусловлено тем, что в качестве химического реагента, используемого для засева облаков, применяется цемент. На применение данного реагента ни температура облаков, ни их фазовое состояние существенно не влияют, т. е. они могут не учитываться [5].

Ниже приведены результаты исследований, касающиеся оценок пригодности к рассеянию переохлажденных волнистообразных, слоистообразных и конвективных облаков над Центральным районом Европейской территории России. Так, на рис. 1 представлены данные, характеризующие оценки пригодности переохлажденных волнистообразных облаков к рассеянию над рассматриваемым районом.

Представленные на рис. 1 (а также и на рис. 2) оценки пригодности переохлажденных волнистообразных облаков к рассеянию получены в результате обработки материалов самолетного зондирования атмосферы ТАЭ-7,7м над аэропортом Внуково за 1953–1964 годы с использованием критерия пригодности, упомянутого выше. Случаи с многослойной облачностью, когда один слой был пригоден к рассеянию, а другой (другие) – нет, из рассмотрения исключались.

Согласно представленным на рис. 1 данным, наиболее часто пригодные к рассеянию волнистообразные облака наблюдаются в январе (87,0%) и феврале (87,5%); значительно реже – в ноябре (61,6%). В декабре и марте значения повторяемости пригодных к рассеянию волнистообразных облаков вновь увеличиваются, достигая значений 73,8 и 79,0% соответственно. В целом волнистообразные облака пригодны к засеву с целью рассеяния зимой в 81,8% случаев, в холодное полугодие – в 76,9% случаев.

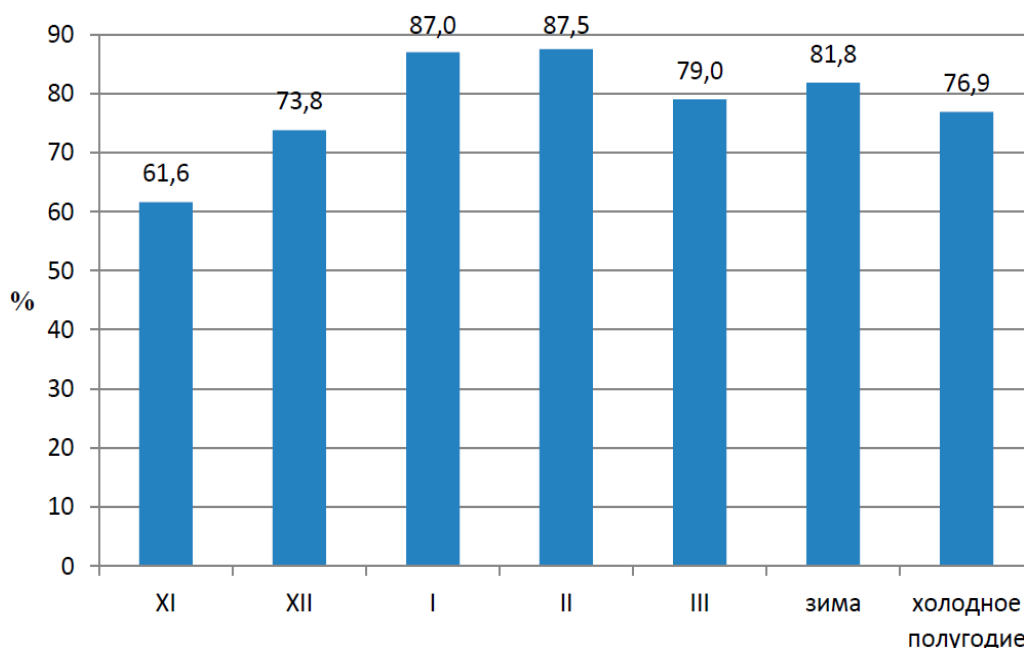


Рис. 1. Повторяемость (%) пригодных к рассеянию переохлажденных волнистообразных облаков

Представленные на рис. 2 результаты обработки данных относятся к волнистообразным облакам без разделения на облака с осадками и без осадков. Вместе с тем в ряде случаев необходимо иметь сведения о пригодности к рассеянию волнистообразных облаков как с осадками, так и без осадков. Поэтому на рис. 2 показаны данные о пригодности волнистообразных облаков к рассеянию с разделением их по указанным признакам. Так как мощность и влагогенерирующая способность волнистообразных облаков с осадками невелики, то можно допустить, что засеивание таких облаков приведет к их рассеянию.

Можно видеть, что наиболее часто пригодные к рассеянию волнистообразные облака с осадками и без осадков наблюдаются в январе (84,4 и 88,4%) и феврале (89,7 и 86,3%). Менее всего они пригодны к засеиванию в ноябре (69,8 и 58,5% соответственно). В целом же за зиму и холодное полугодие величины повторяемости пригодных к рассеянию волнистообразных облаков с осадками и без осадков остаются довольно высокими (85,3 и 80,2%; 82,0 и 75,2% соответственно).

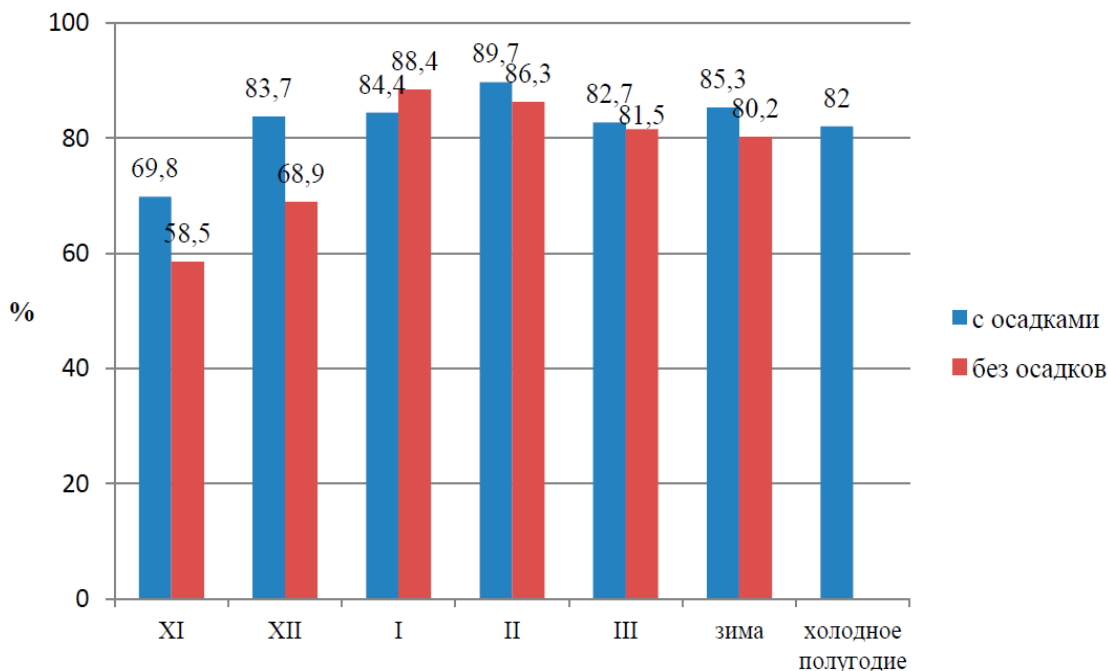


Рис. 2. Повторяемость (%) пригодных к рассеянию волнистообразных облаков с осадками и без осадков

Следует заметить, что практически во все месяцы холодного полугодия (за исключением января) чаще бывают пригодны к рассеянию волнистообразные облака с осадками. При этом разность в показателях пригодности волнистообразных облаков с осадками и без осадков может достигать 10%.

Приведенные выше результаты могут явиться основой для разработки методики прогноза пригодности переохлажденных волнистообразных облаков в холодное полугодие (особенно зимой) над Центральным районом Европейской территории России.

При планировании и проведении работ по рассеянию волнистообразных облаков очень важно знать, сколько облачных слоев необходимо рассеять. Так как волнистообразные облака могут быть расслоенными, то возникает необходимость в получении данных о количестве слоев, одновременно пригодных для рассеяния.

Установлено, что для волнистообразных облаков как с осадками, так и без них присуще преобладание одного слоя, пригодного для рассеяния. Следует отметить, что эта тенденция наиболее четко выражена в отношении волнистообразных облаков без осадков. Во все месяцы холодного полугодия повторяемость пригодности к рассеянию одного слоя превышает 60,0% случаев, достигая 70,3% – в ноябре и 70,6% – в феврале.

Для волнистообразных облаков с осадками величина повторяемости таких условий меньше. Так, например, в январе и феврале повторяемость пригодных к рассеянию однослойных облаков не превышает 48,5 и 47,2% соответственно. Поэтому при засеве волнистообразных облаков с осадками необходимо принимать во внимание тот факт, что почти в половине случаев для получения положительного эффекта необходимо рассеивать два-три слоя облаков.

Приведенные данные о пригодности к рассеянию указанных облаков относятся к случаям использования в качестве химического реагента твердой углекислоты. Вместе с тем в последние годы предпринимаются попытки рассеяния слоистообразной облачности со средней температурой облачного слоя выше минус 3°C. Натурные эксперименты по засеву таких облаков с помощью твердой углекислоты дали положительные результаты [15, 16]. Однако в этом случае необходимо существенное увеличение (в несколько раз) количества химического реагента. Более убедительные опыты по рассеянию облачных слоев с такой температурой были проведены с использованием в качестве реагента жидкого пропана, верхний предел применимости которого равен минус 1°C [17].

В связи с возможностью применения жидкого пропана для рассеяния переохлажденных волнистообразных облаков возникает необходимость в получении данных о повторяемости условий, благоприятных для засева облачных слоев, имеющих среднюю температуру от минус 1°C до минус 3°C. Проведение такой работы – предмет самостоятельных исследований.

Необходимо отметить, что полученные в работе оценки пригодности переохлажденных волнистообразных облаков к рассеянию могут быть также использованы и в качестве оценок пригодности этих облаков к воздействию с целью их стабилизации. Достижение второй цели воздействия может быть осуществлено за счет увеличения норм расхода применяемых химических реагентов (в частности, твердой углекислоты). Иными словами, осуществляется перезасев переохлажденных волнистообразных облаков.

Многочисленные эксперименты в нашей стране и за рубежом по засеву волнистообразных облаков убедительно показали возможность их рассеяния. Однако в последние годы стали проводиться работы с целью изучения возможности рассеяния также и фронтальных облаков. В частности, в экспериментах, описанных в работе [18], приводятся сведения о положительных результатах, полученных при засеве слоистообразных облаков мощностью до 1000 м и более.

В качестве реагента использовалась твердая углекислота. В зарубежных экспериментах при использовании пиропатронов на основе йодистого серебра мощность рассеяния слоистообразных облаков уже составляет почти полтора километра [19].

С учетом вышеизложенного можно сделать вывод о необходимости получения данных о повторяемости пригодных к рассеянию слоистообразных облаков. Полученные оценки по этому вопросу для Центрального района представлены на рис. 3.

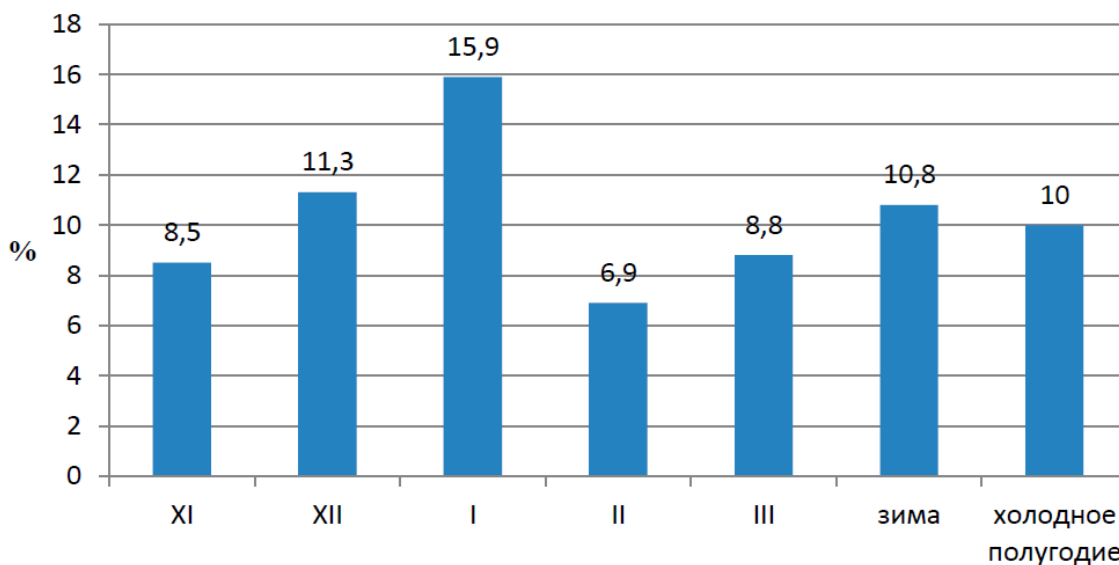


Рис. 3. Повторяемость (%) пригодных к рассеянию переохлажденных слоистообразных облаков без осадков

Поскольку слоистообразным облакам присуща большая влагогенерирующая способность, то можно ожидать, что засев осадконесущих фронтальных облаков вряд ли приведет к достижению положительного результата. Поэтому полученные в настоящей работе оценки относятся только лишь к слоистообразным облакам без осадков. Из анализа данных, представленных на рис. 3, следует, что повторяемость пригодных к рассеянию слоистообразных облаков невелика и составляет всего 10,8% зимой и 10,0% в холодное полугодие. Наиболее часто пригодные к засеву слоистообразные облака наблюдаются в январе (15,9%) и декабре (11,3%). В остальные месяцы холодного полугодия пригодные к рассеянию облака

отмечаются реже. Повторяемость таких слоистообразных облаков составляет в марте 8,8%, ноябре – 8,5%, в феврале понижаясь до 6,9%.

Столь незначительные величины повторяемости пригодных к рассеянию слоистообразных облаков, скорее всего, связаны со сложной фазовой структурой таких облаков и их мощностью. Кроме того, согласно принятой методике в выборку включены только случаи, когда пригодными к рассеянию были все облачные слои. Если же один или несколько слоев были не пригодны к рассеянию, этот случай зондирования из рассмотрения исключался. В то же время именно слоистообразным облакам без осадков присуща значительная расслоенность.

Изучение вопроса о числе слоев, одновременно пригодных к рассеянию, показало, что, в отличие от волнистообразных облаков, пригодными к рассеянию могут быть одновременно несколько слоев. При этом картина меняется существенно от месяца к месяцу. Например, в ноябре чаще всего пригодным к рассеянию является один слой (66,7%), а в январе – уже три слоя (60,0%). Вместе с тем в декабре пригодными к рассеянию являются два и три слоя одновременно (57,1 и 42,9%).

Полученные выше данные указывают на то, что задача рассеяния слоистообразных облаков, в отличие от волнистообразных облаков, является достаточно сложной, поскольку необходимо рассеивать не один, а несколько слоев. Эти данные также нужны при планировании и проведении работ по воздействию на слоистообразные облака с целью их рассеяния, поскольку облака такого типа весьма часто появляются осенью и зимой в Центральном районе Европейской территории России.

Наряду с полученными выше оценками пригодности к рассеянию переохлажденных волнистообразных и слоистообразных облаков, на рис. 4 показаны данные, характеризующие пригодность конвективных облаков к засеву с целью их разрушения [4].

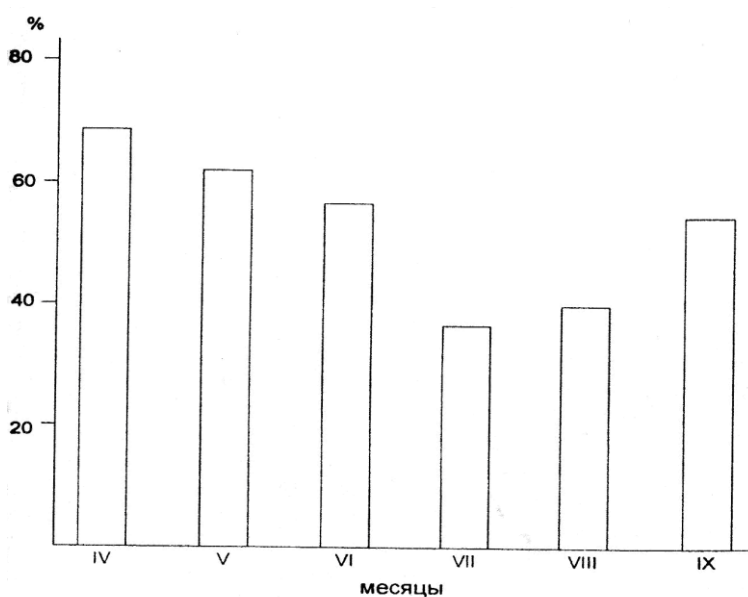


Рис. 4. Повторяемость (%) пригодных к рассеянию конвективных облаков

Представленные на рисунке оценки повторяемости пригодных к рассеянию конвективных облаков показывают, что чаще всего условия для воздействия на облака отмечаются в апреле (68%). В июле таких облаков наблюдается меньше всего – 40%. В теплое полугодие повторяемость пригодных к рассеянию конвективных облаков составляет чуть более 50%.

Следует отметить, что к настоящему времени в нашей стране разработан ряд руководящих документов в области воздействия на конвективные облака (например, [20]).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены количественные оценки пригодности переохлажденных волнистообразных, слоистообразных и конвективных облаков к воздействию с целью рассеяния облачного покрова. Установлено, что переохлажденные волнистообразные облака пригодны к рассеянию (стабилизации) зимой в 81,8% случаев, в холодное полугодие – в 76,9% случаев, слоистообразные облака – в 10,8 и 10,0% случаев соответственно.

Повторяемость конвективных облаков, пригодных к рассеянию, составляет в среднем в теплое полугодие чуть более 50%, достигая максимума в апреле (68%) и минимума в июле (40%).

Полученные в работе данные могут быть использованы при планировании, подготовке и проведении мероприятий, связанных с воздействием на переохлажденные волнистообразные, слоистообразные и конвективные облака с целью их рассеяния для решения широкого круга прикладных задач (обеспечение авиации; проведение поисково-спасательных работ, экологического мониторинга, спортивно-массовых мероприятий; перераспределение осадков; вымывание вредных примесей из атмосферы и др.).

Список используемых источников

1. Фролов А.В. Современная российская гидрометеорологическая служба: новации и точки роста: пленарный доклад // Труды VII Всероссийского метеорологического съезда, 7–9 июля 2014 г., Санкт-Петербург. – СПб.: ООО «Д'АРТ», 2015. – С. 9–31.

2. Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Малкарова А.М. Состояние и перспективы развития работ по активным воздействиям в Российской Федерации и за рубежом: пленарный доклад // Труды VII Всероссийского метеорологического съезда, 7–9 июля 2014 г., Санкт-Петербург. – СПб.: ООО «Д'АРТ», 2015. – С. 151–174.

3. Корнеев В.П., Кулешов Ю.В., Щукин Г.Г. Современное состояние и перспективы применения авиационной технологии активного воздействия на облака для метеозащиты от аномальных явлений погоды и последствий техногенных катастроф // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2016. – Вып. 650. – С. 109–121.

4. Доронин А.П. Воздействия на атмосферные процессы и явления: учеб. пособие. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2014. – 293 с.

5. Колосков Б.П., Корнеев В.П., Щукин Г.Г. Методы и средства модификации облаков, осадков и туманов. – СПб.: РГГМУ, 2012. – 341 с.

6. Методика модифицирования переохлажденных волнистообразных облаков с целью вызывания искусственных осадков / А.П. Доронин, Н.А. Козлова, В.М. Петроченко, Г.Г. Щукин // Ученые записки РГГМУ. – 2018. – № 53. – С. 9–18.

7. Методика расчета параметров операции по рассеянию волнистообразных облаков для решения хозяйственных и экологических задач / А.П. Доронин, Н.А. Козлова, В.М. Петроченко, С.А. Шмалько // Экология и космос: тр. III Всерос. конф. имени академика К.Я. Кондратьева. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2017. – С. 184–188.

8. Эмпирические модели водности и водозапаса волнистообразных и слоистообразных облаков над Центральным районом Европейской территории России / А.П. Доронин, Н.А. Козлова, В.М. Петроченко и др. // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2016. – Вып. 658. – С. 54–61.

9. Сонечкин Д.М., Хандурова И.С. Результаты исследования пространственной изменчивости облачности над Европейской частью СССР // Труды Гидрометцентра. – Л., 1969. – Вып. 50. – С. 37–46.

10. *Волкова В.И.* Вероятность сохранения состояний облачности через различные интервалы времени над отдельными районами Советского Союза // Труды ВНИИГМИ-МЦД. – М., 1976. – Вып. 49. – С.20–24.
11. Исследование фазового состояния слоистообразной облачности над центральными районами России применительно к проблеме модифицирования / А.П. Доронин, Н.А. Козлова, В.М. Петроченко и др. // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2016. – Вып. 651. – С. 91–97.
12. *Половина И.П.* Рассеяние переохлажденных слоистообразных облаков. – Л.: Гидрометеоздат, 1980. – 214 с.
13. *Половина И.П.* Воздействия на внутримассовые облака слоистых форм. – Л.: Гидрометеоздат, 1971. – 215 с.
14. *Прихотько Г.Ф.* Искусственные осадки из конвективных облаков. – Л.: Гидрометеоздат, 1968. – 158 с.
15. *Дубинчик С.К.* Оценка возможности рассеяния облаков и туманов при температурах выше минус 3°C // Труды Укр. НИГМИ. – 1972. – Вып. 114. – С. 113–123.
16. О некоторых вопросах эффективности рассеяния слоистообразных облаков и туманов / И.П. Половина, Е.И. Кравченко, С.К. Кудрявцева и др. // Труды Укр. НИГМИ. – 1983. – Вып. 193.
17. *Gerdel R.W.* Note of the use of liquified propane for fog dispersal at the Medford Jackson airport Oregon // Journal of Applied meteorology. – 1968. – Vol. 7, № 1. – P. 1039–1040.
18. *Воронов Г.С.* К вопросу о возможности рассеяния переохлажденных слоистых форм и туманов большой вертикальной протяженности // Труды Укр. НИГМИ. – 1985. – Вып. 214. – С. 83–91.
19. *Joe L. Sutherland, John R. Thompson and Don A. Griffith.* Seeding tests on super cooled stratus using vertical foll pyrotechnics // Journal of Applied meteorology. – 1980. – Vol. 21, № 2. – P. 248–251.
20. РД 52.11.678. Методологические указания. Проведение работ по искусственному подавлению развития конвективных облаков самолетными средствами. – М.: Метеоагентство Росгидромета, 2006. – 22 с.

Ю.Н. Мамаев*,

*кандидат техн. наук,
старший научный сотрудник;*

И.В. Милосердов**,

доктор техн. наук, профессор;

Л.А. Овчаренко**,

доктор техн. наук, доцент;

А.П. Саркисян*,

*кандидат техн. наук,
старший научный сотрудник*

*АО «НТЦ РЭБ», г. Москва

**ЦСАМ АО «НТЦ РЭБ», г. Санкт-Петербург

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ КОМПЛЕКСОВ ПАССИВНОГО РАДИОМОНИТОРИНГА ПО ОБНАРУЖЕНИЮ И ОПРЕДЕЛЕНИЮ КООРДИНАТ ВОЗДУШНЫХ ЦЕЛЕЙ, ОБЛУЧАЕМЫХ СИГНАЛАМИ ИМПУЛЬСНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ

На примере комплекса пассивного радиомониторинга «Автобаза-М» определены возможности по обнаружению и измерению координат воздушных неизлучающих целей. Это стало возможно за счет приема вторичного излучения при облучении их сигналами радиолокаторов наземного или воздушного базирования.

Ключевые слова: геолокация, пассивный комплекс радиомониторинга, сторонний источник «подсвета», импульсная радиолокационная станция активного зондирования.

ВВЕДЕНИЕ

Роль систем пассивного радиомониторинга (ПР) в условиях все возрастающего количества средств борьбы с радиоэлектронными средствами (РЭС) активного зондирования систем противовоздушной обороны (ПВО) неуклонно повышается, поскольку они обеспечивают высокую надежность и точность определения координат источников радиоизлучения (ИРИ), оставаясь при этом недоступными для радиоэлектронной разведки противника [1]. Однако не все воздушные цели используют включенные на излучение РЭС, по сигналам которых могут осуществляться их обнаружение и определение координат. Одним из путей решения указанных задач комплексом ПР является прием вторичного излучения от целей при их облучении сигналами наземных или воздушных РЭС. В качестве таких РЭС могут быть использованы наземные радиолокационные станции (РЛС) группировки ПВО, самолетные РЛС бокового обзора, РЛС управления оружием ударной авиации, РЛС самолетов дальнего радиолокационного обнаружения и управления (ДРЛОУ).

Цель опубликования статьи – на примере комплекса ПР «Автобаза-М» показать возможность решения задачи обнаружения и определения координат целей с неизлучающими РЭС за счет «подсвета» сторонними РЛС.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПЛЕКСА «АВТОБАЗА-М» И ПРЕДПОЛАГАЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ «ПОДСВЕТА»

Разработанный АО «НТЦ РЭБ» комплекс ПР «Автобаза-М» имеет достаточно высокие характеристики по чувствительности приемных устройств, вероятности приема различных видов сигналов и диапазону рабочих частот (табл. 1) [2]. Это дает основание полагать, что

данный комплекс может обеспечить обнаружение не только сигналов излучающих РЭС, но и сигналов, отраженных от неизлучающих воздушных целей.

В качестве источника «подсвета» для неизлучающих воздушных целей наиболее целесообразно использовать самолетные РЛС систем ДРЛОУ (табл. 2) [3], а также наземные РЛС,

Таблица 1

Основные тактико-технические характеристики комплекса ПР «Автобаза-М»

№ п/п	Характеристика	Комплекс «Автобаза-М»
1	Объекты разведки	РЛС тактической авиации, станции помех, самолеты ДРЛОУ
2	Рабочий диапазон частот	0,2–18 ГГц
3	Дальность обнаружения	До 400 км
4	Метод определения координат	Разностно-дальномерный
5	Коэффициент шума приемника	4 дБ
6	Коэффициент усиления антенн	В частотном диапазоне 2–18 ГГц: 8–17 дБ В частотном диапазоне 0,2–2 ГГц: не менее 5 дБ
7	Динамический диапазон	70 дБ в режиме динамической регулировки, 50 дБ мгновенный
8	Максимальное время сканирования в рабочем частотном диапазоне	Время анализа 10 мс: станция обработки информации (СОИ): 0,08 с; станция обнаружения и пеленгования (СОП): – в диапазоне частот 0,2–2 ГГц – 5,5 с; – в диапазоне частот 2–18 ГГц – 2,9 с. Время анализа 5 мс: СОИ: 0,04 с; СОП: – в диапазоне частот 0,2–2 ГГц – 3 с; – в диапазоне частот 2–18 ГГц – 1,6 с

Таблица 2

Основные тактико-технические характеристики самолетных РЛС систем ДРЛОУ

№ п/п	Наименование характеристик	Тип РЛС		
		АН/АРУ-1(2)	АН/АПС-125 (138, 145)	АН/ТПС-43
1	Диапазон частот, ГГц	2,86–3,45	0,39–0,46	1,2–3,1
3	Сектор обзора (азимут/угол места)	0–360 ⁰ /+8 ⁰ ÷ (-15 ⁰)	0–360 ⁰ /0–21 ⁰	0–360 ⁰ /–
4	Способ и темп обзора (азимут/угол места)	Круговое вращение, 36 ⁰ /с Электронное сканирование, 85–110 Гц	Круговое вращение, 36 ⁰ /с	Круговое вращение, 60 ⁰ /с
5	Ширина диаграммы направленности (азимут/угол места)	1 ⁰ /5 ⁰	8 ⁰ /21 ⁰	1,1 ⁰ /1,5 ⁰ –8,1 ⁰
6	Уровень боковых лепестков, дБ	От -30 до -54	-	-
7	Импульсная мощность, кВт	670–1150	1000	Средняя: 6,7
8	Длительность импульсов, мкс	-	2–4; 8,5; 10–15	6,5
9	Частота повторения, кГц	0,7–0,12; 25–30,5	3–3,5	0,25

поскольку они обладают высоким энергетическим потенциалом, а диапазон частот излучаемых ими сигналов соответствует диапазону рабочих частот комплекса «Автобаза-М».

РАСЧЕТ ВОЗМОЖНОСТЕЙ КОМПЛЕКСА «АВТОБАЗА-М» ПО ОБНАРУЖЕНИЮ ВОЗДУШНЫХ ЦЕЛЕЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЮ ИХ КООРДИНАТ В РЕЖИМЕ ПРИЕМА ОТРАЖЕННЫХ СИГНАЛОВ

Пусть в качестве источников «подсвета» целей применяются РЛС самолетов ДРЛОУ. В общем виде пространственное расположение комплекса ПР и объектов обнаружения при использовании в качестве источника «подсвета» РЛС систем ДРЛОУ показано на рис. 1.

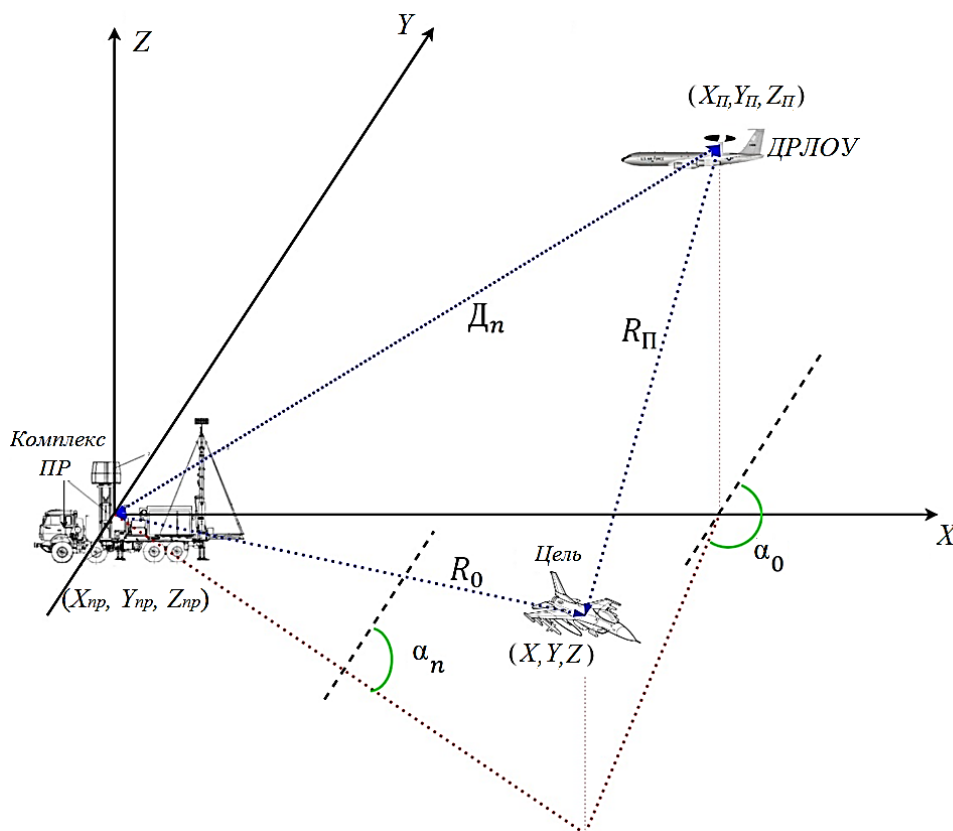


Рис. 1. Пространственное расположение комплекса ПР и объектов разведки при использовании в качестве источника «подсвета» РЛС систем ДРЛОУ

Для обнаружения комплексом ПР неизлучающих воздушных целей необходимо выполнение следующих условий:

- уровни отраженных от цели сигналов и разведываемых комплексом ПР сигналов РЛС «подсвета» должны находиться в пределах динамического диапазона радиоприемных устройств (РПУ) комплекса;
- пространственная зона, где отраженный сигнал превышает уровень чувствительности РПУ, должна быть соизмерима с зоной обнаружения комплекса ПР при его работе в штатном режиме.

Как следует из анализа приведенных в табл. 2 данных, уровень боковых лепестков антенны передатчика РЛС ДРЛОУ достаточно низкий. Естественно полагать, что отраженный от цели сигнал будет уверенно приниматься РПУ комплекса ПР только в случае ориентации на эту цель главного лепестка вращающейся с постоянной скоростью антенны РЛС. Мощность отраженного от цели сигнала можно рассчитать по формуле бистатической радиолокации [4]

$$P_{\text{отр}} = \left(\frac{P_{\Pi} \cdot G_n}{4 \cdot \pi \cdot R_{\Pi}^2} \right) \cdot \left(\frac{\sigma(\alpha_0, \alpha_n, K)}{4 \cdot \pi \cdot R_0^2} \right) \cdot \left(\frac{\lambda^2 \cdot G_{\text{прк}}}{4 \cdot \pi} \right), \quad (1)$$

где P_{Π} – импульсная мощность передатчика подсвета, Вт;
 G_n – коэффициент усиления антенны передатчика РЛС «подсвета»;
 R_{Π}^2 – расстояние между РЛС «подсвета» и неизлучающей целью;
 R_0^2 – расстояние между неизлучающей целью и РПУ комплекса ПР;
 σ – бистатическая (двухпозиционная) ЭПР воздушной цели;
 α_0 – угол падения сигнала, излучаемого РЛС на воздушную цель;
 α_n – угол отражения сигнала РЛС от цели в направлении на РПУ комплекса ПР;
 K – курсовой угол цели;
 $G_{\text{прк}}$ – коэффициент усиления приемной антенны РПУ комплекса ПР;
 λ – длина волны.

Как правило, комплекс ПР принимает сигнал обнаруживаемой РЛС по боковому лепестку диаграммы направленности ее антенны [1]. Мощность такого сигнала на входе РПУ может быть вычислена по формуле [4]:

$$P_{\text{прк}} = \left(\frac{P_{\Pi} \cdot G_n \cdot G_{\text{б}}}{4 \cdot \pi \cdot D_n^2} \right) \cdot \left(\frac{\lambda^2 \cdot G_{\text{прк}}}{4 \cdot \pi} \right), \quad (2)$$

где D_n^2 – расстояние между РЛС «подсвета» и РПУ комплекса;
 $G_{\text{б}}$ – уровень боковых лепестков антенны РЛС.

Из формул (1) и (2) получаем оценку динамического диапазона РПУ комплекса, требуемого для одновременного приема отраженных сигналов воздушных целей, мощностью $P_{\text{отр}}$, и сигналов РЛС «подсвета», мощностью $P_{\text{прк}}$:

$$\frac{P_{\text{отр}}}{P_{\text{прк}}} = \left(\frac{\lambda^2 \sigma(\alpha_0, \alpha_n, K)}{4 \pi G_{\text{б}}} \right) \cdot \left(\frac{D_{\Pi}^2}{R_n^2 \cdot R_0^2} \right). \quad (3)$$

При $(\alpha_0 - \alpha_n) < 90^\circ$ для многих воздушных целей входящая в формулу (3) бистатическая ЭПР $\sigma(\alpha_0, \alpha_n, K)$ соизмерима с моностатической ЭПР [4, 5]. В то же время при больших значениях бистатических углов величина ЭПР может как уменьшаться вследствие затенения отраженного сигнала конструктивными элементами цели в направлении второго бистатического угла α_n , так и возрастать для целей с гладкими поверхностями. При бистатических углах, приближающихся к 180° , ЭПР цели может возрастать на несколько порядков [4, 5].

При проведении дальнейших оценок числовых значений отношения (3) будем полагать, что двухпозиционная ЭПР соизмерима с однопозиционной и равна $5\text{--}30 \text{ м}^2$, т. е.

$$\sigma(\alpha_0, \alpha_n, K) \approx \sigma \approx 5 \div 30 \text{ м}^2, \quad (4)$$

а уровень боковых лепестков антенн РЛС систем типа АВАКС или «Хокай» составляет в среднем от -30 до -40 дБ (см. табл. 2).

На рис. 2 изображены проекции на прямоугольную систему координат рассчитанных по формуле (3) значений требуемого динамического диапазона РПУ с учетом дальности прямой видимости при высоте подъема антенн комплекса «Автобаза-М» 20 м (координаты $X_{\text{пр}}=0$; $Y_{\text{пр}}=0$; $Z_{\text{пр}}=0,02$ км), выраженные в децибелах. При вычислениях полагалось, что удаление ДРЛОУ от комплекса ПР составляет 300 км, высота полета носителя РЛС равна 12 км (координаты $X_{\Pi}=300$ км; $Y_{\Pi}=0$; $Z_{\Pi}=12$ км), а цель с ЭПР 5 м^2 находится на высоте 1 км.

С учетом ранее приведенных данных о ТТХ комплекса «Автобаза-М» (см. табл. 1) полученные результаты свидетельствуют о том, что динамический диапазон РПУ комплекса ПР обеспечивает на удалении до 100 км от района его развертывания прием сигналов, отраженных от воздушных целей, и на дальности 300 км – прием сигналов ДРЛОУ, излучаемых по боковым лепесткам РЛС «подсвета».

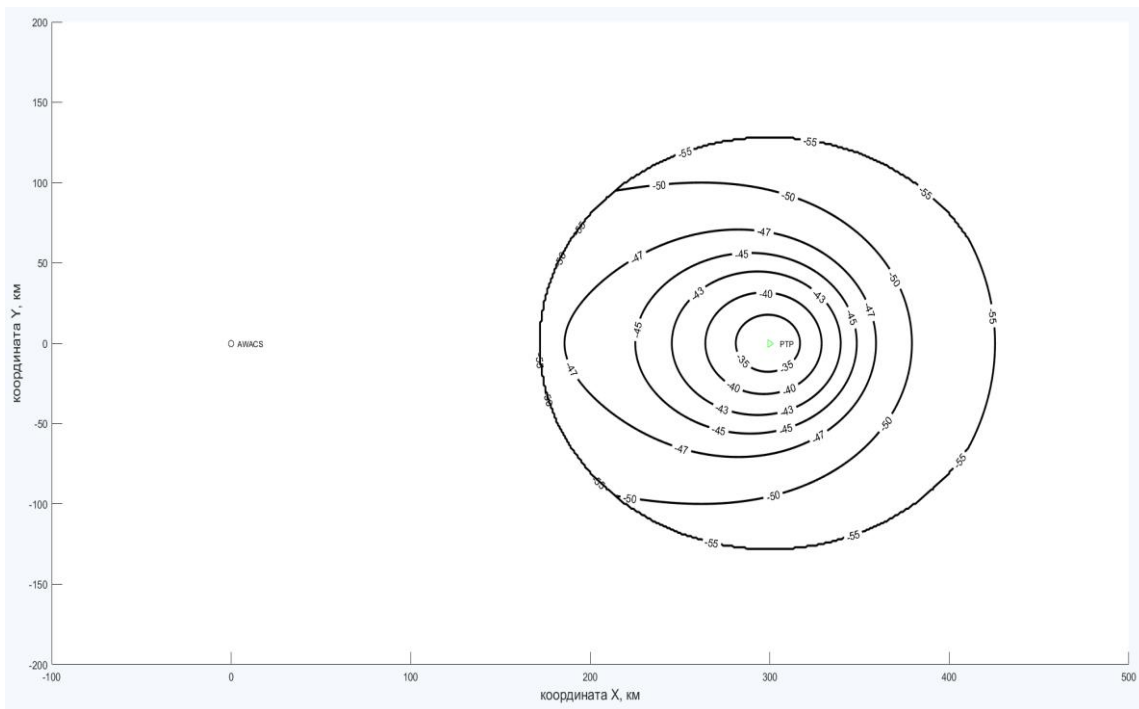


Рис. 2. Линии уровней динамического диапазона РПУ комплекса «Автобаза-М», требуемого для одновременного приема отраженного сигнала и сигнала «подсвета» цели (в децибелах)

Выражение (1) может быть также использовано для определения границ зоны обнаружения отраженных сигналов с учетом приведенных в табл. 1 данных об эквивалентной чувствительности РПУ комплекса. На рис. 3 показаны линии уровней мощности отраженного сигнала в районе комплекса ПР, рассчитанные по приведенным выше исходным данным.

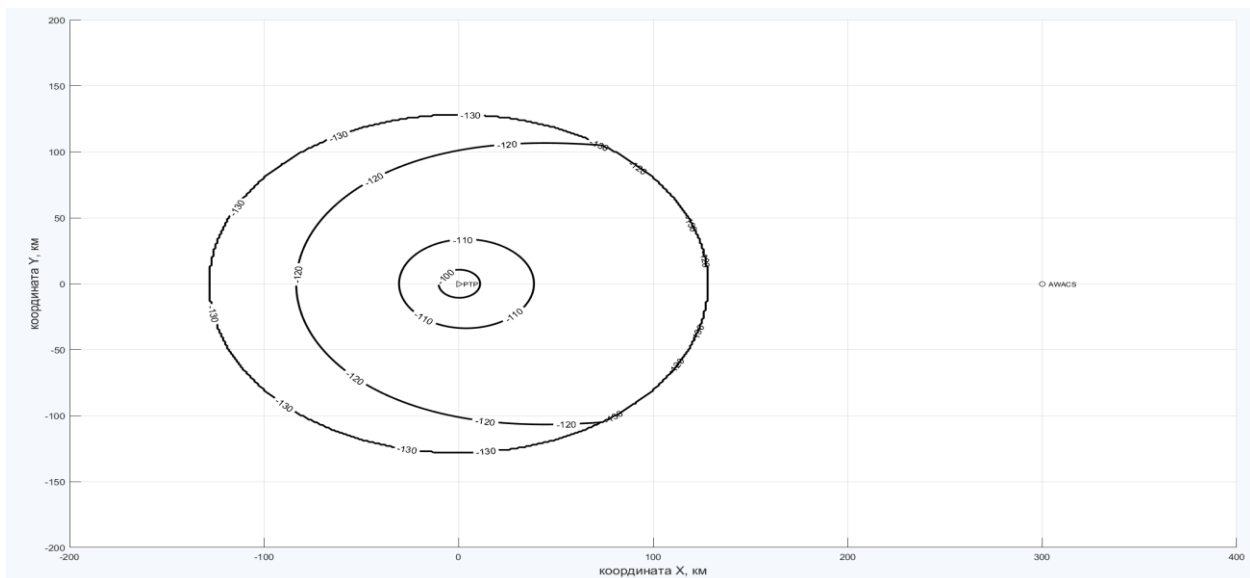


Рис. 3. Линии уровней мощности сигнала, отраженного от цели с ЭПР 5 м^2 при удалении РЛС ДРЛОУ на расстояние 300 км (дБ/Вт)

Из анализа рис.3 видно, что динамический диапазон РПУ комплекса «Автобаза-М» позволяет обнаруживать воздушные цели на дальностях 100–120 км.

Если применять реализованный в комплексе ПР алгоритм поиска, то для обнаружения отраженного от цели сигнала необходимо совместное выполнение двух событий: облучение цели главным лепестком антенны РЛС «подсвета», а также соответствие текущего азимута приемной антенны комплекса направлению на цель и совпадение диапазона частот настройки РПУ комплекса с частотой излучения РЛС ДРЛОУ. Вероятности наступления указанных событий соответственно могут быть вычислены по формулам:

$$W_{\text{обл}} = \frac{\Theta_{\text{РЛС}}}{360}, \quad (5)$$

$$W_{\text{набл}} = \frac{\tau_a}{T_{\text{ск}}}. \quad (6)$$

где $\Theta_{\text{РЛС}}$ – ширина главного лепестка диаграммы направленности антенны РЛС;

τ_a – время анализа сигнала в СОП комплекса;

$T_{\text{ск}}$ – максимальное время азимутально-частотного сканирования при текущем времени анализа τ_a .

Подставляя из табл. 1 и 2 значения входящих в выражения (5) и (6) параметров ($\Theta_{\text{РЛС}} = 1^\circ$; $\tau_a = 5$ мс; $T_{\text{ск}} \leq 2,9$ с), получаем вероятность обнаружения цели комплексом ПР:

$$W_{\text{обн}} = W_{\text{набл}} \cdot W_{\text{обл}} \approx 4,8 \times 10^{-6}. \quad (7)$$

Следовательно, при штатном алгоритме работы комплекса, когда поиск сигналов осуществляется во всем рабочем диапазоне частот вкруговую по азимуту, вероятность приема отраженного от неизлучающей цели сигнала ничтожно мала.

Вместе с тем в комплексе «Автобаза-М» имеется возможность изменить порядок азимутально-частотного обзора пространства так, чтобы приемные устройства были настроены на рабочую частоту РЛС «подсвета», а пространственный обзор постоянно осуществлялся в заданном секторе наблюдения, например, 45° или 90° . В этом случае при обзоре в секторе 45° сигнал, отраженный от неизлучающей цели, будет обнаруживаться при каждом ее облучении РЛС «подсвета», а при обзоре в секторе 90° – при каждом втором облучении.

Текущие координаты ДРЛОУ могут быть определены комплексом ПР разностно-дальномерным методом за счет измерения разностей путей распространения сигнала РЛС, излучаемого по боковым лепесткам ее антенны [2]. Тогда для определения координат цели достаточно будет измерить азимут на цель относительно РЛС «подсвета», а также суммарные пути распространения сигнала «подсвета» от РЛС до цели и от цели до РПУ не менее чем на двух разнесенных периферийных приемных позициях комплекса.

Рассмотрим суть предлагаемого подхода.

Как правило, суммарный путь «РЛС – Цель – РПУ» измеряется через вычисление взаимокорреляционной функции (ВКФ) сигнала «подсвета», принимаемого опорным каналом, и отраженного от цели сигнала, принимаемого целевым каналом. Экстремум ВКФ соответствует задержке [4]

$$\Delta\tau = \frac{(R_{\text{п}} + R_0 - D_{\text{п}})}{c}, \quad (8)$$

где c – скорость распространения электромагнитной волны в свободном пространстве.

Поскольку координаты ДРЛОУ считаем известными, то $D_{\text{п}} = \text{const}$, а цель будет находиться на поверхности эллипсоида вращения, расстояния от которой до фокусов в местах расположения ДРЛОУ и РПУ комплекса ПР задаются соотношением [4]

$$R_{\text{п}} + R_0 = \text{const}. \quad (9)$$

В свою очередь, азимут на цель со стороны ДРЛОУ может быть определен путем фиксации моментов «прохождения» главного лепестка антенны РЛС «подсвета» через место расположения РПУ. Если антенна РЛС ДРЛОУ функционирует в режиме кругового вращения с постоянной скоростью, то, синхронизируясь по периоду вращения, а также постоянно измеряя текущие координаты этой РЛС, нетрудно определить направление главного лепестка ее антенны в любой момент времени. Тогда, фиксируя момент приема отраженного сигнала, всегда можно вычислить текущий азимут на цель со стороны РЛС «подсвета».

Таким образом, последовательность измерения координат цели предлагаемым способом заключается в следующем.

Вначале измеряются величины суммарного пути «РЛС – Цель – РПУ» по отраженным от цели сигналам, принятым не менее чем двумя периферийными РПУ комплекса на разнесенных позициях. Эти измерения дают две поверхности положения цели в виде эллипсоидов вращения, общими точками пересечения которых будет линия эллипса, проходящая через местоположение цели. Затем определяется текущая оценка координат цели как пересечение линии эллипса с плоскостью, образуемой азимутом на цель со стороны РЛС «подсвета» и точкой с координатами местоположения этой РЛС.

Аналогичным образом могут быть определены координаты целей при «подсвете» сигналами наземных РЛС.

Потенциальная точность оценки координат предлагаемым способом может быть определена через вычисление ковариационной матрицы ошибок местоопределения, получаемой из функций правдоподобия угломерного и суммарно-дальномерного методов оценки параметров положения [6].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ОБНАРУЖЕНИЮ ВОЗДУШНЫХ ЦЕЛЕЙ, ОБЛУЧАЕМЫХ РЛС НАЗЕМНОГО БАЗИРОВАНИЯ

Для практического подтверждения возможности приема отраженных сигналов и оценки координат воздушных целей был проведен эксперимент. В качестве источника «подсвета» использовалась РЛС, развернутая в районе аэропорта Пулково. Излучаемый этой РЛС сигнал представляет собой комбинацию линейно-частотно-модулированных и немодулированных радиоимпульсов (рис. 4).

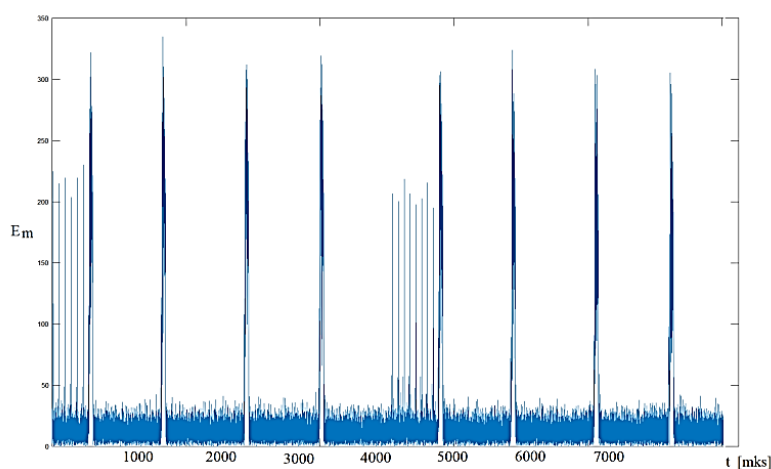


Рис. 4. Этюры сигнала РЛС, расположенной в районе аэропорта Пулково

Для обнаружения и определения координат воздушных целей использовались два пункта приема сигналов. Первый пункт развертывался в непосредственной близости от РЛС (на удалении около 3 км) и осуществлял запись опорного сигнала. Второй приемный пункт развертывался в районе г. Гатчина (на удалении 28 км от РЛС «подсвета») и применялся для приема и записи отраженных от целей сигналов. Запись сигналов на обоих пунктах осуществлялась синхронно с точностью не хуже 100 нс. В качестве приемных антенн применялась рупорная антенна с шириной диаграмм направленности $30^\circ \times 30^\circ$.

Записанные сигналы подвергались корреляционной обработке для измерения суммарной дальности «РЛС – Цель – РПУ», а вычисление азимута на цель осуществлялось описанным выше способом за счет синхронизации с периодом вращения антенны РЛС и фиксации моментов приема отражений от цели.

Результаты расчетов отображены в виде экрана монитора РЛС (рис. 5). Здесь вместе с отметками обнаруженных целей представлена также информация, получаемая путем приема сигналов системы автоматического зависимого наблюдения-вещания (ADS-B). Указанная информация использовалась для сопоставления полученных отметок от целей с передаваемыми самолетами собственными координатами.

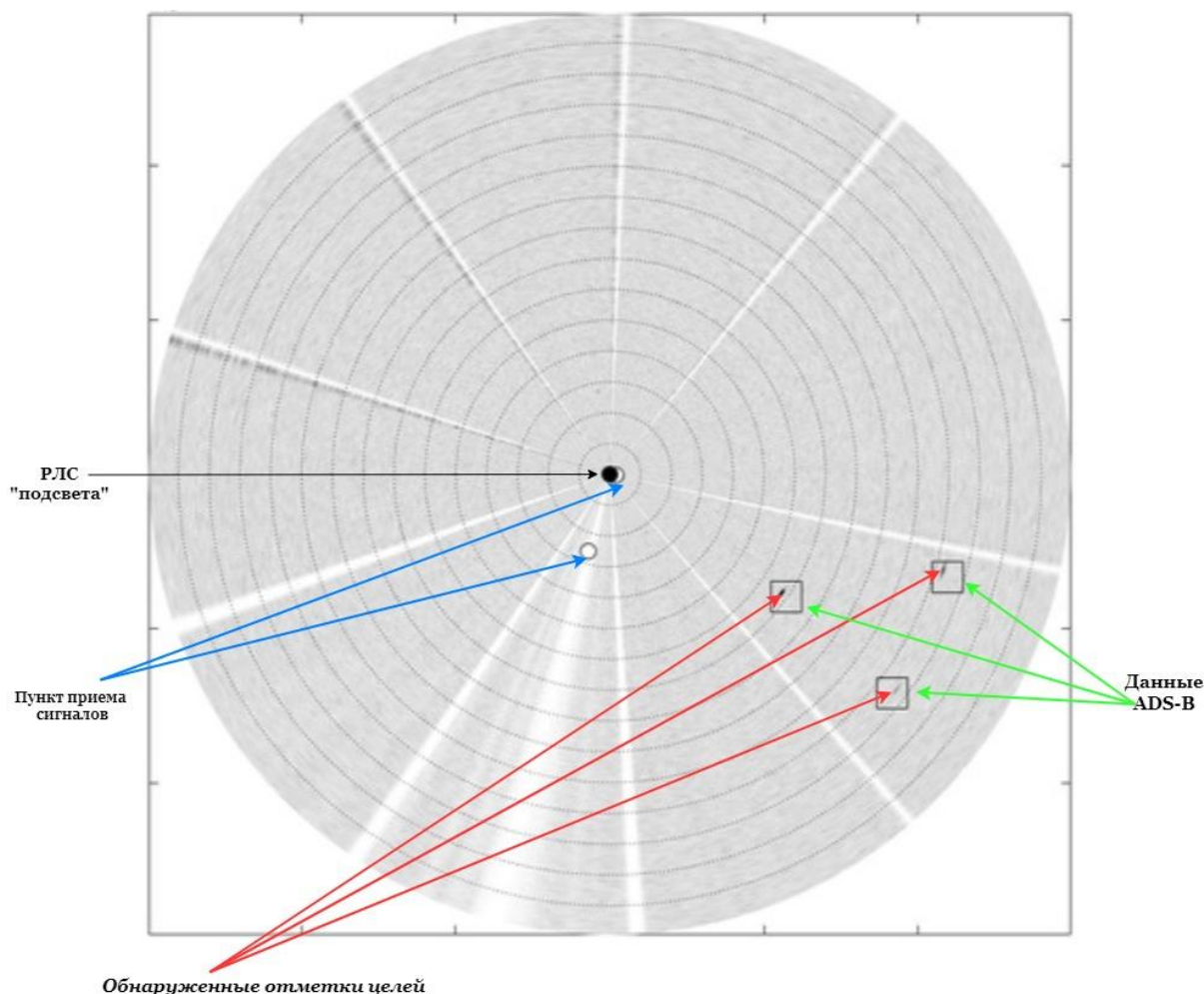


Рис. 5. Вид отображаемой воздушной обстановки

В результате проведенного эксперимента установлено, что обнаружение гражданских пассажирских самолетов происходило при суммарной дальности до цели порядка 160–180 км,

что обусловлено их значительной ЭПР, а точность определения координат целей, оцениваемая относительно данных, получаемых по сигналам системы ADS-B, составила 200–400 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам работы, можно сделать следующие выводы.

1. Зона обнаружения неизлучающих целей сопоставима с рабочей зоной комплекса ПР «Автобаза-М». Чувствительность и динамический диапазон РПУ позволяют использовать этот комплекс для обнаружения неизлучающих целей при наличии в его зоне ответственности высокоэнергетических РЛС наземного, морского или воздушного базирования.

2. К достоинствам предложенного способа обнаружения неизлучающих целей по переотраженному сигналу можно отнести:

- возможность определения координат цели без применения пеленгаторов только за счет обработки сигналов, принимаемых двумя РПУ, развернутыми на разных позициях;

- отсутствие необходимости использования широкополосных каналов связи между элементами комплекса;

- возможность применения относительно узкополосных приемных устройств, работающих только в полосе РЛС «подсвета».

К недостаткам способа следует отнести:

- необходимость наличия РЛС с известными координатами, сигнал которой может использоваться для «подсвета» целей;

- меньшая точность определения координат цели, чем при известных пассивных методах разведки.

3. При реализации предлагаемого способа ПР необходимо учесть, что сигнал, переотраженный от неизлучающей цели, может приниматься СОП комплекса с периодичностью, соответствующей периодичности обзора РЛС «подсвета», т. е. примерно один раз в 6–10 с.

Поэтому для повышения вероятности обнаружения цели по сигналу «подсвета» необходимо изменить алгоритм азимутально-частотного обзора комплекса «Автобаза-М» таким образом, чтобы увеличить вероятность наблюдения отраженного сигнала. Для этого РПУ комплекса должен быть постоянно настроен на рабочую частоту РЛС «подсвета», а азимутальный сектор приема – соответствовать требуемой зоне обнаружения цели.

4. Представляется целесообразным проработать возможность создания станции разведки неизлучающих целей, в которой в качестве РЭС «подсвета» используются маломощные источники сигнала, а для повышения чувствительности СОП осуществляется взаимокорреляционная обработка прямого и отраженного сигналов.

Список используемых источников

1. Современная радиолокация (анализ, расчет, проектирование систем) / пер. с англ. под ред. Ю.Б. Кобзарева. – М.: Сов. радио, 1969. – 704 с.

2. Пат. 2615992 Рос. Федерация: МПК H04/H04K. Наземный комплекс радиотехнической разведки «Автобаза-М» / Мамаев Ю.Н., Саркисян А.П., Скворцов В.С.; заявитель и патентообладатель акционерное общество «Оборонительные системы». – №217.015.BBD7; заявл. 23.12.2015; опублик. 12.04.2017. – 3 с.

3. Тактико-технические характеристики самолетов системы «АВАКС» США и НАТО. – URL: <http://nato.radioscanner.ru/files/article115/e3a.jpg> (дата обращения: 27.11.2018).

4. Справочник по радиолокации: в 4 т. / под ред. М.И. Сколника; пер. с англ. под общ. ред. К.Н. Трофимова. – М.: Сов. радио, 1976.

5. *Аверьянов В.Я.* Разнесенные радиолокационные станции и системы. – Мн.: Наука и техника, 1978. – 184 с.
6. Математическая модель оценки потенциальной точности многопозиционной системы, использующей комплексирование информации радиотехнических и радиолокационных измерителей / Э.А. Кирсанов, Л.А. Овчаренко, И.В. Милосердов, А.А. Шульгин // Радиотехника. – 2017. – №12. – С. 26–33.

Г.В. Никитин;
А.В. Шишкалов,
кандидат техн. наук, доцент

МЕТОД ДЕКОМПОЗИЦИИ ПРОТОКОЛЬНЫХ БЛОКОВ С ПАКЕТНЫМ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕМ РЕЧЕВЫХ ДАННЫХ АБОНЕНТОВ

В статье рассмотрен метод, позволяющий производить декомпозицию протокольных блоков с пакетным мультиплексированием речевых данных абонентов, передаваемых в групповых цифровых потоках спутниковых систем связи с коммутацией пакетов. Метод основан на обнаружении и оценивании параметров поля «идентификатор длины» в условиях отсутствия описания структуры протокольных блоков с речевыми данными за счет наличия корреляции между двоичными комбинациями в поле и размером сегмента протокольного блока с речевыми данными.

Ключевые слова: мультиплексирование речевых данных, протоколы передачи речи, декомпозиция протокольных блоков данных.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для передачи пользовательских данных широкое распространение получили спутниковые системы связи (ССС), обладающие рядом преимуществ по сравнению с другими видами связи. В современных ССС используется технология с коммутацией пакетов, которая предполагает, что к передаваемому блоку данных добавляются заголовки со служебной информацией на каждом уровне эталонной модели взаимодействия открытых систем (ЭМВОС). В этом случае сигнал речевого сообщения абонента подвергается аналого-цифровому преобразованию и низкоскоростному кодированию речи (НКР), в результате которого он преобразуется в последовательность речевых кадров (кадров с параметрами речевого сигнала или комфортного шума). Передача речи в реальном времени предполагает добавление к каждому речевому кадру служебной информации в виде заголовков протоколов IP (Internet Protocol), UDP (User Datagram Protocol) и RTP (Real-time Transport Protocol), суммарный размер которых составляет 40 байт [1]. Протокол RTP является универсальным. С его помощью могут передаваться разные типы мультимедийной информации в реальном времени в разнообразных условиях, поэтому добавляемая протоколом RTP служебная информация избыточна. Это приводит к неэффективному использованию канала связи.

Производители оборудования разрабатывают различные способы сокращения избыточности передаваемых данных в целях повышения эффективности использования ресурса канала связи. Для передачи речевых сообщений абонентов одной локальной автоматической телефонной станции активно применяется технология пакетного мультиплексирования речевых данных абонентов, поддерживающая изменение скорости кодирования речи. Технология предполагает, что к каждому речевому кадру добавляется заголовок со служебной информацией, а полученные пары заголовков и речевых кадров объединяются в один протокольный блок речевых данных (ПБРД) прикладного уровня ЭМВОС. В силу отсутствия стандартизированного протокола пакетного мультиплексирования речевых данных, производители спутникового оборудования передачи данных (такие как iDirect, Hughes, Comtech, ViaSat и др.) разрабатывают свои собственные фирменные протоколы, описание которых отсутствует в открытом доступе.

Решение специфических задач, стоящих перед радиочастотной службой, требует оценивать интенсивности передаваемого по каналу ССС трафика речевых сообщений. Это воз-

можно только в случае выполнения процедуры декомпозиции ПБРД прикладного уровня ЭМВОС с целью разделения группового потока на речевые кадры абонентов. Современные методы не позволяют производить декомпозицию ПБРД в условиях отсутствия информации об его структуре и параметрах. Основная сложность заключается в том, что положение заголовков в ПБРД вариативно и зависит от размеров всех мультиплексируемых речевых кадров.

Таким образом, цель работы состоит в описании унифицированного метода декомпозиции протокольных блоков с пакетным мультиплексированием речевых данных абонентов на речевые кадры абонентов, устойчивого к модификациям правил формирования, определяемых протоколом.

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ПРОТОКОЛЬНЫХ БЛОКОВ С ПАКЕТНЫМ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕМ РЕЧЕВЫХ ДАННЫХ

Пусть W_j – j -й ПБРД размером $L_j^{(нбд)}$ двоичных символов, Q – один из его структурных элементов с параметрами $L_0^{(cs)}$ и $L^{(cs)}$, определяющими его положение в структуре ПБРД и размер соответственно. Предположим, что его старшие разряды следуют первыми, тогда W_j и Q можно представить следующим образом:

$$Q = \left\langle w_{j, L_0^{(cs)}}, w_{j, L_0^{(cs)}+1}, \dots, w_{j, L_0^{(cs)}+L^{(cs)}} \right\rangle$$

$$W_j = \left\langle w_{j,1}, w_{j,2}, \dots, \underbrace{w_{j, L_0^{(cs)}}, w_{j, L_0^{(cs)}+1}, \dots, w_{j, L_0^{(cs)}+L^{(cs)}}}_Q, \dots, w_{j, L^{(нбд)}} \right\rangle \quad (1)$$

где w – двоичный элемент ПБРД.

Особенностью протокольного блока с пакетным мультиплексированием речевых данных абонентов является то, что он формируется путем конкатенации V сегментов. Каждый сегмент ПБРД состоит из речевого кадра B и добавленного к нему заголовка, содержащего поле «идентификатор длины» Θ . Исходя из этого протокольный блок речевых данных с пакетным мультиплексированием можно представить следующим образом:

$$W_j = \left\{ C_{j,1}, C_{j,2}, \dots, C_{j,v}, \dots, C_{j,V_j} \right\},$$

$$C_{j,v} = \left\{ \Theta_{j,v}, B_{j,v} \right\}, \quad (2)$$

$$C_{j,v} = \left\langle w_{L_{j,v}^{(нз)}, j}, w_{L_{j,v}^{(нз)}+1, j}, \dots, w_{L_{j,v}^{(нз)}+L_{j,v}^{(с)}, j} \right\rangle,$$

где W_j – j -й ПБРД;

V_j – число сегментов, входящих в состав j -го ПБРД;

$C_{j,v}$ – v -й сегмент j -го ПБРД;

$L_{j,v}^{(с)}$ – размер v -го сегмента j -го ПБРД;

$L_{j,v}^{(нз)}$ – смещение первого символа v -го сегмента относительно начала j -го ПБРД;

$B_{j,v}$ – речевой кадр, передаваемый в v -м сегменте j -го ПБРД;

$\Theta_{j,v}$ – комбинация двоичных символов в поле «идентификатор длины»,

$$\Theta_{j,v} = \left\langle \theta_{1,j,v}, \dots, \theta_{l_{\Theta,j,v}, j,v}, \dots, \theta_{L^{(дл)}, j,v} \right\rangle, \quad \theta_{l_{\Theta,j,v}, j,v} \in \{0,1\};$$

$L^{(дл)}$ – размер поля «идентификатор длины»;

$w_{l,j}$ – l -й двоичный символ j -го ПБРД, $w_{l,j} \in \{0,1\}$.

Положение поля «идентификатор длины» характеризуется смещением $L_0^{(дл)}$ относительно начала заголовка. Таким образом, формируемая структура j -го протокольного блока речевых данных с пакетным мультиплексированием представлена на рис. 1.

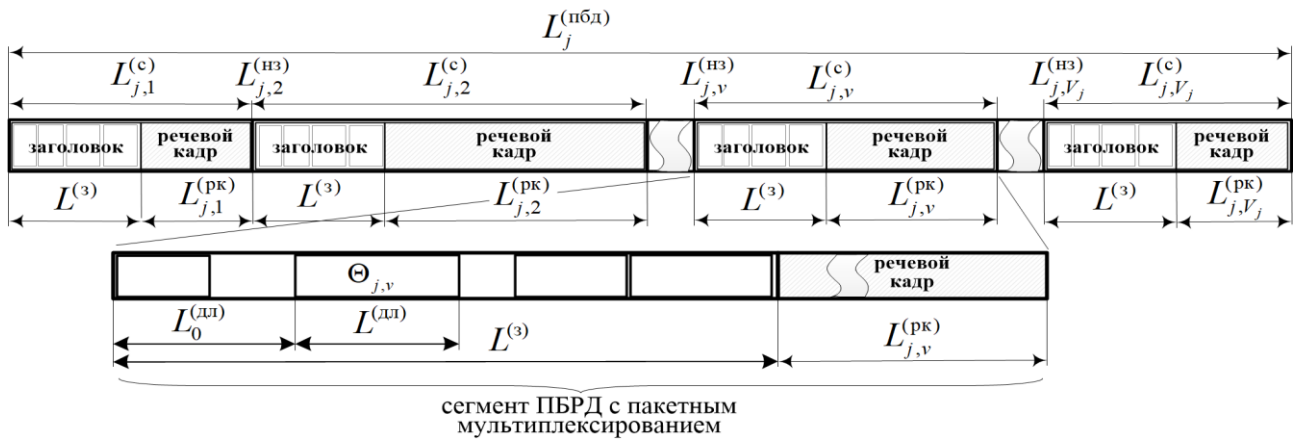


Рис. 1. Структура j -го протокольного блока речевых данных с пакетным мультиплексированием

В современных системах связи осуществляется адаптация скорости НКР к условиям передачи данных по каналу связи, поэтому алгоритм кодирования может быть установлен для каждого блока речевых данных из $N^{нкp}$ реализованных алгоритмов в кодере речи. Следовательно, размер речевого кадра может принимать одно из ограниченного числа значений $L_{j,v}^{(рк)} \in \{L_1^{(рк)}, L_2^{(рк)}, \dots, L_{N^{нкp}}^{(рк)}\}$. При этом будем полагать, что $L_1^{(рк)}$ соответствует наименьшему размеру речевого кадра (кадра с параметрами комфортного шума), а $L_{N^{нкp}}^{(рк)}$ – максимальному размеру.

Структура заголовка, добавляемого к блокам речевых данных, размер $L^{(з)}$ и параметры его основных структурных элементов определяются протоколом ПМРД и в рамках конкретной реализации протокола являются неизменными. В заголовках передается информация, необходимая для демultipлексирования и восстановления речевых сообщений на приемной стороне, поэтому в заголовке обязательно наличие полей: «идентификатор длины», «адресная часть», «номер по порядку» и «метка времени».

Размер сегмента ПБРД $L_{j,v}^{(с)}$ определяется суммой размера заголовка $L^{(з)}$ и переменного размера речевого кадра $L_{j,v}^{(рк)}$. Информация о нем содержится в поле «идентификатор длины», которая кодируется комбинацией двоичных символов $\Theta_v = \langle \theta_{1,v}, \theta_{2,v}, \dots, \theta_{L^{(дл)},v} \rangle$, $\theta_{l,v} \in \{0,1\}$, поэтому каждому из возможных размеров сегмента $L_{j,v}^{(с)}$ через правило $\Upsilon^{(дл)}$ однозначно соответствует только одна комбинация двоичных символов в поле «идентификатор длины»:

$$L_{j,v}^{(с)} = \Upsilon^{(дл)}(\Theta_{j,v}). \quad (3)$$

Число сегментов V_j может варьироваться от одного до нескольких десятков для каждого j -го ПБРД в отдельности и зависит от числа одновременно передаваемых речевых сообщений локальной автоматической телефонной станцией (АТС) в момент формирования j -го ПБРД. В соответствии с теорией телетрафика вероятность p_{V_j} того, что локальной АТС

в момент формирования j -го ПБРД передается V_j речевых сообщений. Это определяется выражением [2]

$$p_{V_j} = \begin{cases} p_0 \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^{V_j} \frac{1}{V_j!}, & V_j \leq N^{(ar)} \\ 0, & V_j > N^{(ar)} \end{cases}, \quad (4)$$

где p_0 – вероятность того, что в определенный момент времени в локальной АТС

не передается ни одного речевого сообщения, $p_0 = \left[\sum_{k=0}^{N^{(ar)}} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^k \frac{1}{k!} \right]^{-1}$;

λ – интенсивность потока поступления вызовов;

μ – интенсивность потока завершения вызовов;

V_j – число речевых сообщений, одновременно передаваемых локальной АТС на j -м интервале;

$N^{(ar)}$ – максимальное число одновременно передаваемых речевых сообщений.

Разработанный метод основан на обнаружении в групповом потоке и дальнейшем анализе множества ПБРД, состоящих из одного сегмента. Для того чтобы определить минимальный объем выборки, необходимо оценить содержащуюся в ней долю ПБРД, состоящих из одного сегмента. Из выражения (4) следует, что

$$p_1 = \frac{\lambda}{\mu \sum_{k=0}^m \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^k \frac{1}{k!}}. \quad (5)$$

Так как положение поля «идентификатор длины» в структуре ПБРД второго и последующих сегментов зависит от размеров предыдущих сегментов, то декомпозиция ПБРД на отдельные сегменты на приемной стороне производится пошагово от первого сегмента к последующему. На рис. 2 представлена структура ПБРД, состоящего из трех сегментов, а поля «идентификатор длины» определяют границы сегментов через функцию $\Upsilon^{(дл)}$.

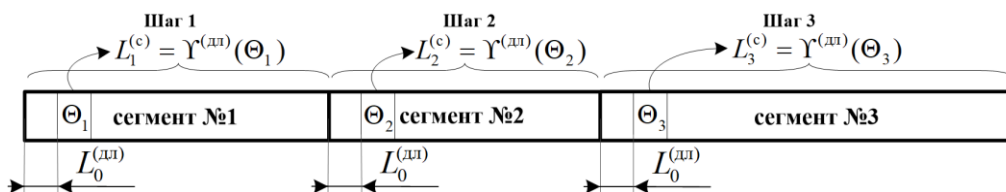


Рис. 2. Протокольный блок с пакетным мультиплексированием речевых данных, состоящий из трех сегментов

Для декомпозиции ПБРД на отдельные сегменты (рис. 2) на шаге 1 по значению комбинации двоичных символов Θ_1 поля «идентификатор длины», смещение которого относительно начала ПБРД для первого сегмента всегда $L_0^{(дл)}$, определяется размер $L_1^{(c)}$ сегмента № 1 ПБРД. При определении положения поля «идентификатор длины» сегмента № 2 (шаг 2) учитываются размер $L_1^{(c)}$ сегмента № 1, определенный на шаге 1, и положение поля «идентификатор длины» $L_0^{(дл)}$ в заголовке. Для определения положения поля «идентификатор длины» сегмента № 3 (шаг 3) учитываются размеры первого $L_1^{(c)}$ и второго $L_2^{(c)}$ сегментов, определенные на предыдущих шагах, а также положение поля в заголовке $L_0^{(дл)}$.

Речевые сообщения абонентов локальной АТС передаются пакетами в групповом цифровом потоке, образованном в результате объединения потоков данных $K_{\text{гп}}$ приложений. При формировании пакета к ПБРД добавляются заголовки протоколов UDP и IP.

Таким образом, ПБРД с пакетным мультиплексированием имеет следующие свойства.

Свойство № 1. Сегмент ПБРД имеет переменный размер, зависящий от размера речевого кадра, сформированного кодером речи.

Свойство № 2. Размер сегмента ПБРД $L^{(c)}$ принимает ограниченное число вариантов, равных числу $N^{\text{НР}}$ алгоритмов кодирования, реализованных в кодере речи. При этом значение размера сегмента $L^{(c)}$ не может выходить за пределы возможного интервала $L^{(c)} \in [L^{(3)} + L_1^{(\text{РК})}, L^{(3)} + L_{N^{\text{НР}}}^{(\text{РК})}]$.

Свойство № 3. Каждому значению размера сегмента ПБРД соответствует своя уникальная комбинация двоичных символов в поле «идентификатор длины».

Свойство № 4. В накопленной выборке ПБРД присутствует доля ПБРД, содержащих только один сегмент, равная p_1 .

Указанные свойства легли в основу метода декомпозиции протокольных блоков с пакетным мультиплексированием речевых данных абонентов на основе обнаружения и определения параметров поля «идентификатор длины».

ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ МЕТОДА ДЕКОМПОЗИЦИИ ПРОТОКОЛЬНЫХ БЛОКОВ С ПАКЕТНЫМ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕМ РЕЧЕВЫХ ДАННЫХ АБОНЕНТОВ

Разработанный метод декомпозиции протокольных блоков с пакетным мультиплексированием речевых данных абонентов обеспечивает обнаружение и определение параметров поля «идентификатор длины», а также декомпозицию протокольных блоков с пакетным мультиплексированием речевых данных на сегменты по информации в нем. Метод состоит из пяти последовательных этапов.

Этап 1. Формирование исходных данных. Исходными данными для этапа 1 является множество пакетов $E_{\{\}}^{\{\}}$, передаваемых по каналу ССС в групповом сигнале. В соответствии со значениями IP-адреса и UDP-порта получателя (сокета) формируются M множеств протокольных блоков данных (ПБД) прикладного уровня ЭМВОС, причем таким образом, что в одном множестве $W_{\{\}}^m$ оказываются ПБД, передаваемые только на один из сокетов.

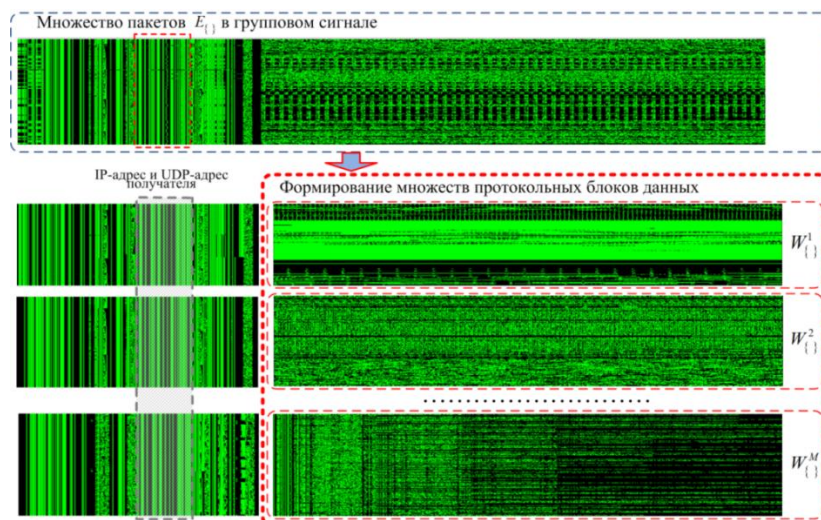


Рис. 3. Формирование множеств ПБД прикладного уровня

Необходимо отметить, что пакеты, в которых на транспортном уровне ЭМВОС используется протокол TCP, а также в которых в результате проверки контрольной суммы или проверки соответствия фактического размера дейтаграммы и указанного в заголовке протокола UDP выявлены ошибки, не рассматриваются.

Этап 2. Определение размеров сегментов ПБРД. Этап 2 выполняется для каждого множества $W_{\{i\}}^m$, полученного на первом этапе, в отдельности. Исходными данными является множество размеров ПБРД прикладного уровня $L_{\{i\}}^{(пбд)}$ в множестве $W_{\{i\}}^m$. Если множество $L_{\{i\}}^{(пбд)}$ содержит хотя бы одно значение меньше $L^{(з)} + L_1^{(рк)}$, то принимается решение о том, что на m -й сокет не осуществляется передача речевых сообщений с пакетным мультиплексированием речевых данных абонентов.

В ходе этапа 2 определяется множество размеров ПБРД $L_{\{H\}}^{(спбд)}$, которые могут соответствовать размерам сегментов ПБРД. Множество $L_{\{H\}}^{(спбд)}$ является подмножеством $L_{\{i\}}^{(пбд)}$, для которого выполняются следующие условия:

- размер ПБРД не превышает максимально допустимый размер сегмента ПБРД $L^{(спбд)} \leq L^{(з)} + L_{N^{нкр}}^{(рк)}$;
- значение размера ПБРД не может быть получено за счет суммы меньших размеров ПБРД $L_s^{(спбд)} \neq k_1 L_a^{(пбд)} + k_2 L_b^{(пбд)} + \dots + k_n L_c^{(пбд)}$, $k_1, k_2, \dots, k_n \in \mathbb{N}_0$, $L_s^{(пбд)}, L_a^{(пбд)}, L_b^{(пбд)}, \dots, L_c^{(пбд)} \in L_{\{i\}}^{(пбд)}$.

Множества ПБРД $W_{\{i\}}^m$, для которых выполняется условие $2 \leq |L_{\{H\}}^{(спбд)}| \leq N^{нкр}$, рассматриваются на этапе 3, в противном случае принимается решение о том, что на m -й сокет не передаются речевые сообщения с пакетным мультиплексированием речевых данных абонентов.

Например, пусть множество $L_{\{i\}}^{(пбд)} = \{10, 20, 22, 30, 32, 37, 40, 42, 44, 47, 52, 57, 62, 66\}$. Тогда в результате выполнения этапа 2 будет получено множество $L_{\{i\}}^{(спбд)} = \{10, 22, 37\}$ (рис. 4).

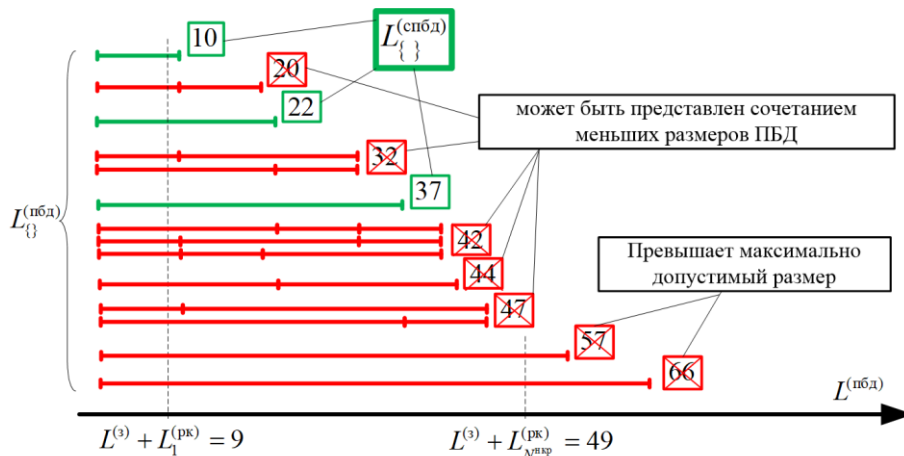


Рис. 4. Пример определения множества размеров сегментов ПБРД

Полученное на этапе 2 множество $L_{\{H\}}^{(спбд)}$ может содержать не все множество значений размеров сегментов ПБРД $L_{\{i\}}^{(с)}$. В случае, когда один из действительных размеров сегментов равен сумме размеров двух других, его значение будет исключено ошибочно.

Этап 3. Определение границ области поиска поля «идентификатор длины» в заголовке сегмента ПБРД. Этап 3 выполняется в целях сокращения числа возможных вариантов для перебора параметров $L_0^{(дл)}$ и $L_0^{(дл)}$ поля «идентификатор длины». Для этого из множества

$W_{\{ \}}$ формируются H подмножеств, каждое из которых содержит протокольные блоки данных одинаковых размеров, равных значениям элементов множества $L_{\{H\}}^{(спбл)}$ (рис. 5). Тогда

$$W_{\{ \}}^m \rightarrow \{W_{1\{ \}}^m, \dots, W_{H\{ \}}^m\}. \tag{6}$$

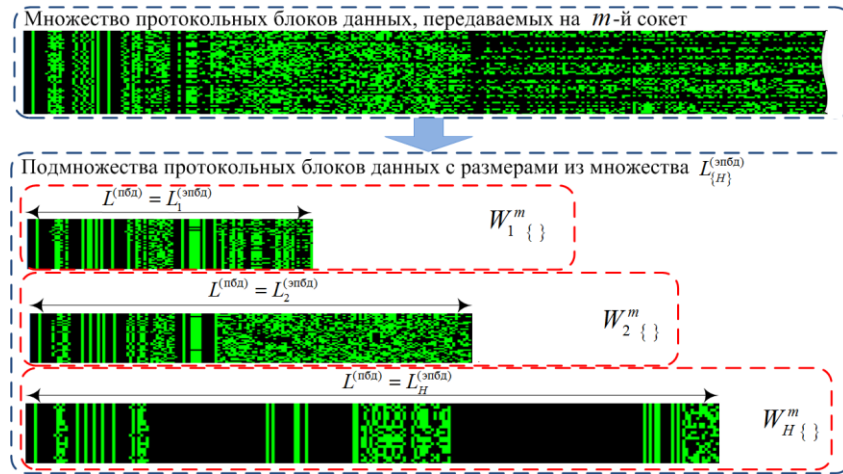


Рис. 5. Формирование подмножеств ПБД с одинаковыми размерами, равными размерам предполагаемых сегментов ПБРД

Если подмножество W_h^m является множеством протокольных блоков речевых данных, состоящих из одного сегмента одинакового размера, то комбинация двоичных символов в поле «идентификатор длины» должна быть постоянной. Для каждого из H подмножеств W_h^m (рис. 6,а) вычисляется индикаторная функция $\delta_h^m(l)$, определяющая положение двоичных символов, не относящихся к полю «идентификатор длины» (рис. 6,б). Индикаторная функция $\delta_h^m(l)$ определяется по следующему правилу:

$$\delta_h^m(l) = \begin{cases} -1, & \text{если } l\text{-й двоичный символ принимает разные значения} \\ 1, & \text{если } l\text{-й двоичный символ имеет постоянное значение} \end{cases} \tag{7}$$

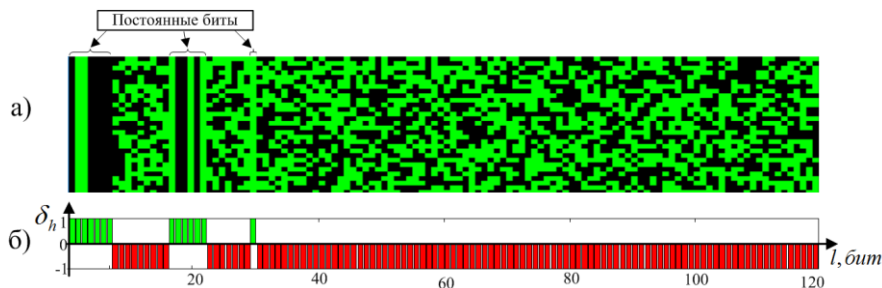


Рис. 6. Определение индикаторной функции:
а – графическое представление множества ПБД; б – индикаторная функция

Для каждого из H множеств W_h^m могут получиться индикаторные функции, отличные друг от друга. Необходимо определить индикаторную функцию $\delta^m(l)$, обобщающую все H индикаторные функции $\delta_h^m(l)$, согласно следующему правилу:

$X_n(L^{(дл)}, L_0^{(дл)})$ – значение комбинации двоичных символов в двоичном коде в n -м ПБД при предполагаемом варианте значений параметров поля $L^{(дл)}$ и $L_0^{(дл)}$,

$$X_n(L^{(дл)}, L_0^{(дл)}) = \langle z_{n, L_0^{(дл)}}, z_{n, L_0^{(дл)}+1}, \dots, z_{n, L_0^{(дл)}+L^{(дл)}} \rangle;$$

$L^{(дл)}$ – предполагаемый размер поля «идентификатор длины»;

$L_0^{(дл)}$ – предполагаемое смещение поля «идентификатор длины» относительно начала заголовка;

$L_n^{(пбд)}$ – размер n -го ПБД;

N – число ПБД в множестве $Z_{\{N\}}^m$.

Признаком того, что подбираемые значения параметров поля «идентификатор длины» $L^{(дл)}$ и $L_0^{(дл)}$ совпадают с истинными значениями, будем считать равенство единице коэффициента корреляции $r(L^{(дл)}, L_0^{(дл)})$. Результаты оценки коэффициента корреляции при разных значениях подбираемых параметров поля $L^{(дл)}$ и $L_0^{(дл)}$ представлены на рис. 8.

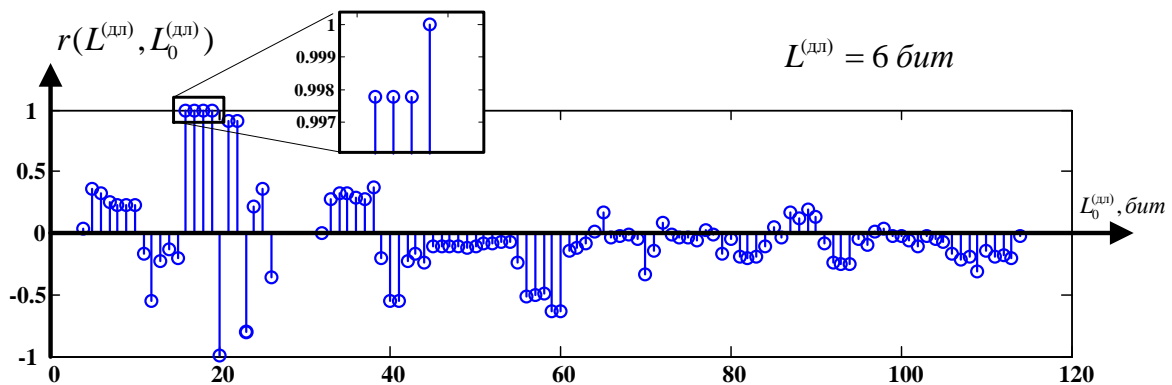


Рис. 8. Пример оценки коэффициента корреляции между комбинацией двоичных символов и размером ПБД

В ряде случаев возможна ситуация, при которой непосредственно перед полем «идентификатор длины» или сразу за ним передаются двоичные символы, имеющие постоянное значение. В этом случае коэффициент корреляции $r(L^{(дл)}, L_0^{(дл)})$ будет равен единице и тогда, когда вариант перебора параметров поля $L^{(дл)}$ и $L_0^{(дл)}$ предполагает, что постоянные двоичные символы относятся к полю «идентификатор длины». В силу этого следует считать истинным вариант с наименьшей величиной параметра $L^{(дл)}$.

Таким образом, в результате на этапе 4 в множестве ПБД, передаваемых на m -й сокет, может быть обнаружено поле «идентификатор длины» и определены его параметры $L^{(дл)}$, $L_0^{(дл)}$, а также соответствие длины сегмента ПБРД и комбинации двоичных символов в поле. В случае, если поле «идентификатор длины» не обнаружено, можно сделать вывод о том, что на m -й сокет не осуществляется передача речевых сообщений с пакетным мультиплексированием речевых данных абонентов.

Этап 5. Декомпозиция ПБД на сегменты и оценка качества обнаружения поля «идентификатор длины» блоков. Для проверки корректности полученных данных о параметрах поля «идентификатор длины» осуществляется декомпозиция всех протокольных блоков данных множества W_h^m в соответствии со значениями двоичных комбинаций в обнаруженном поле «идентификатор длины» (см. рис. 2). Если все протокольные блоки данных множества

W_h^m делятся на части без остатка, значит, поле «идентификатор длины» обнаружено правильно. Выходными данными на этапе 5 будет множество $C_{\{}}$ отдельных сегментов ПБРД.

В силу того что для каждого протокола структура заголовка и параметры поля «идентификатор длины» неизменны, разработанный метод применяется однократно. Дальнейшая декомпозиция ПБРД производится в реальном масштабе времени по обнаруженному полю «идентификатор длины».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При использовании технологии пакетного мультиплексирования речевых данных абонентов обмен данными между локальными АТС происходит с помощью протокольных блоков данных прикладного уровня ЭМВОС со специфической структурой. Он формируется из вариативного числа сегментов переменной длины. Каждый сегмент содержит данные речи и заголовок с различной служебной информацией. Заголовок содержит поле «идентификатор длины», в котором передается информация о размерах сегментов, что позволяет произвести операцию демultipлексирования на приемной стороне.

Разработанный метод позволяет в групповых цифровых потоках, передаваемых в ССС, обнаруживать передачи с пакетным мультиплексированием речевых данных, выявлять поле «идентификатор длины» и определять его параметры в условиях отсутствия описания структуры ПБРД. Полученные данные дают возможность производить декомпозицию ПБРД на речевые кадры абонентов в реальном масштабе времени и решать задачи мониторинга ССС в целях определения статистики занятости каналов, анализа часов наименьшей и наибольшей загрузки.

Список используемых источников

1. Дилип Н. Стандарты и протоколы Интернета: пер. с англ. – М.: Издательский отдел «Русская редакция» ТОО «Channel Trading Ltd.», 1999. – 384 с.
2. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания: пер. с англ. / пер. И.И. Грушко; ред. В.И. Нейман. – М.: Машиностроение, 1979. – 432 с.
3. Статистические методы обработки результатов наблюдений / Р.М. Юсупов, Г.Б. Петухов, В.Н. Сидоров и др.; под ред. Р.М. Юсупова. – М.: МО СССР, 1984. – 786 с.

И.В. Чернов,
кандидат техн. наук

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИБОРНОЙ ПОПРАВКИ ГИРОТЕОДОЛИТА С ЗАДАННОЙ ТОЧНОСТЬЮ

В данной статье представлен подход к обоснованию точности исходной геодезической основы для выполнения эталонирования гиротеодолитов, числа выполняемых ими пусков и приемов геодезической привязки. Приводится пример методики определения приборной поправки гиротеодолита с заданной точностью для гиротеодолита с лазерным гироскопом в качестве чувствительного элемента. Исходными данными для обоснования методики являются требования к точности получения азимутов направлений, что позволяет подойти к обоснованию требований к определению приборной поправки гиротеодолита с позиции обеспечения заданного результата ориентирования.

Ключевые слова: гиротеодолит, лазерный гироскоп, приборная поправка, заданная точность.

ВВЕДЕНИЕ

Определение азимутов направлений является актуальной и востребованной задачей в геодезической подготовке. Наиболее эффективным методом определения азимутов направлений является гироскопический метод (высоко результативный, наиболее оперативный и менее трудо- и ресурсозатратный среди существующих методов определения азимутов направлений; кроме того, указанный метод обладает высокой автономностью). Для реализации гироскопического метода определения азимутов применяются гиротеодолиты (гироскопа). Для обеспечения штатного функционирования гиротеодолитов (ГТ) необходимо своевременно выполнять их метрологическое обслуживание.

Современная законодательная метрология [1] определяет, что средства измерений, не предназначенные для применения в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, могут в добровольном порядке подвергаться калибровке. Под *калибровкой* понимается совокупность операций, выполняемых в целях определения действительных значений метрологических характеристик средств измерений [1]. Калибровка реализуется путем определения соотношений между значениями величин, полученных при помощи данного измерительного прибора, и соответствующими значениями величин, установленных при помощи эталона [2].

В действующем руководстве по астрономо-геодезическим работам [3] сформулировано понятие «эталонирование». Цель эталонирования заключается в определении постоянной приборной поправки Δ . *Приборная поправка* есть разница между эталонным значением азимута направления и значением азимута направления, полученного гиротеодолитом из многочисленных наблюдений. Введением приборной поправки стремятся устранить постоянную составляющую систематической погрешности в результатах измерений. Очевидно, что под понятиями «эталонирование» [3] и «калибровка» [1, 2] понимается одна и та же операция.

Руководства [3, 4] предписывают проводить «эталонирование» в следующих случаях: получения прибора с завода-изготовителя; ремонта приборов комплекта или длительного хранения; изменения температуры окружающего воздуха более чем на установленную величину; выполнения установленного числа программ определения азимута; транспортировки гиротеодолитов от места «аттестации (эталонирования)» на расстояние, превышающее установленные величины. Научное обоснование этих требований исчерпывающе изложено в работах [5, 6].

Одним из лучших высокоточных ГТ до недавнего времени являлся ГТ-3. Действующее руководство [4] определяет порядок «аттестации (эталонирования)» гиротеодолитов ГТ-3. Цель «аттестации (эталонирования)» в руководстве также состоит в определении приборной поправки Δ . Значение поправки Δ затем используют для коррекции результатов измерений, выполняемых данным комплектом прибора. Под приборной поправкой Δ здесь также понимается систематическая разность между известным значением астрономического азимута исходного (эталонного) направления и значением азимута этого же направления, полученного прибором ГТ-3.

Так как современные гиротеодолиты (ГТ-3, Gyromat 3000, Gyromat 5000 и др.) превысили точности определения азимутов направлений $3''$ [средняя квадратическая погрешность определения азимутов (СКП)], то контрольные (эталонные) азимуты должны быть получены в три раза точнее [7]. То есть СКП азимутов контрольных эталонных направлений должна составлять не более $1''$. На достигнутом уровне науки и техники такая точность определения азимутов направлений является предельной (наивысшей). Этот вывод следует из трудов [8–13]. Таким образом, можно заключить, что «эталонирование» есть калибровка [1, 2] в условиях обеспечения предельной (наивысшей) точности (в данном случае – точности определения азимутов направлений).

Для воспроизведения, хранения и передачи единиц величин с наивысшей точностью в Российской Федерации предназначены государственные первичные эталоны единиц величин [1, 14]. В связи с оперативно возникающей потребностью определения азимутов направлений и широкой географий применения гироскопического метода обеспечить достаточную плотность государственных первичных эталонов астрономических азимутов наивысшей точности, очевидно, ни технически, ни экономически не возможно. В связи с этим возникает актуальная задача по обоснованию методики эталонирования гиротеодолита с заданной точностью.

АЛГОРИТМ ОБОСНОВАНИЯ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИБОРНОЙ ПОПРАВКИ ГИРОТЕОДОЛИТА С ЗАДАННОЙ ТОЧНОСТЬЮ

Необходимость регулярного и внеочередного определения Δ вызвана действием внешних сил, которые накладывают моменты относительно оси прецессии [моменты от температурной разбалансировки чувствительного элемента (ЧЭ), сил трения, сил магнитного взаимодействия и др.]. Также необходимость определения Δ обусловлена появлением деформаций системы подвеса ЧЭ вследствие старения и изменения температуры металла, перемещением оптических деталей при транспортировке, перепадах температур [5, 6]. После определения приборная поправка участвует в вычислении азимутов направлений [5, 6]:

$$a = M - N_0 + \Delta, \quad (1)$$

где Δ – приборная поправка;

M – отсчет по горизонтальному кругу при наведении зрительной трубы на местный предмет;

N_0 – отсчет, соответствующий положению динамического равновесия ЧЭ (направлению меридиана);

a – азимут направления.

Очевидно, погрешности определения Δ искажат значение азимутов.

Для гиротеодолита, конструктивно разделенного на два независимых устройства, не имеющих механического сопряжения (ГТ-3 или САГ), – теодолит и гироблок – СКП определения азимута можно представить в виде

$$m_a^2 = m_{\text{гир}}^2 + m_{\text{гир}0}^2 + m_{a0}^2, \quad (2)$$

где $m_{\text{гир}}$ – СКП определения азимута гиротеодолитом при ориентировании направления;

$m_{\text{гир}0}$ – СКП определения азимута гиротеодолитом при эталонировании;

m_{a0} – СКП определения эталонного азимута.

Учитывая, что процесс определения азимута направления гиротеодолитами типа САГ и ГТ-3 состоит из определения азимута контрольного элемента гироблока и угловой передачи его на ориентируемое направление, справедливо равенство

$$m_{\text{гир}}^2 = m_M^2 + m_N^2. \quad (3)$$

Подставив выражение (3) в формулу (2), получим

$$m_a^2 = m_M^2 + m_N^2 + m_{M0}^2 + m_{N0}^2 + m_{a0}^2, \quad (4)$$

или если известны коэффициенты K [15–17], достоверность априорных расчетов целесообразно повысить, преобразовав соотношение (4) в следующее выражение:

$$m_a^2 = K_n^2 (m_M^2 + m_N^2) + K_{n0}^2 (m_{M0}^2 + m_{N0}^2) + m_{a0}^2,$$

где K_n – эмпирический коэффициент понижения точности, а индекс «0» относится к процессу эталонирования.

Подставляя в выражение (4) в формулу

$$m_{\text{гир}} = \frac{\mu_{\text{гир}}}{\sqrt{n}}, \quad (5)$$

получим модель погрешности определения азимута гиротеодолитом типа ГТ-3 или САГ

$$m_a^2 = \frac{\mu_\beta^2}{n_\beta} + \frac{\mu_N^2}{n} + \frac{\mu_{\beta0}^2}{n_{\beta0}} + \frac{\mu_{N0}^2}{n_0} + m_{a0}^2, \quad (6)$$

где n – число пусков (приемов). Если известны коэффициенты K , то модель ошибок определения азимута гиротеодолитом типа ГТ-3 или САГ примет вид

$$m_a^2 = K_n^2 \left(\frac{\mu_\beta^2}{n_\beta} + \frac{\mu_N^2}{n} \right) + K_{n0}^2 \left(\frac{\mu_{\beta0}^2}{n_{\beta0}} + \frac{\mu_{N0}^2}{n_0} \right) + m_{a0}^2.$$

Исходя из «принципа равных влияний» [7] и полученной модели СКП для случая $K \approx 1$, справедливо записать:

$$\frac{\mu_\beta^2}{n_\beta} \approx \frac{\mu_N^2}{n} \approx \frac{\mu_{\beta0}^2}{n_{\beta0}} \approx \frac{\mu_{N0}^2}{n_0} \approx m_{a0}^2. \quad (7)$$

Известно, что составляющей погрешности допустимо пренебречь в случае, если она составляет треть и менее от другой составляющей или заданной точности [7]. Учитывая этот факт, на основании формулы (7) справедливо записать соотношения заданной погрешности определения астрономического азимута и ее составляющих, которые будут обеспечивать заданную точность ориентирования, следующим образом:

$$\frac{1}{9} m_a^2 \geq \frac{\mu_\beta^2}{n_\beta} \approx \frac{\mu_N^2}{n} \approx \frac{\mu_{\beta0}^2}{n_{\beta0}} \approx \frac{\mu_{N0}^2}{n_0} \approx m_{a0}^2. \quad (8)$$

В случае, если коэффициенты K определены, следует повысить достоверности априорных расчетов, преобразовав выражение (8) в следующее:

$$\frac{1}{9} m_a^2 \geq K_n^2 \frac{\mu_\beta^2}{n_\beta} \approx K_n^2 \frac{\mu_N^2}{n} \approx K_{n0}^2 \frac{\mu_{\beta0}^2}{n_{\beta0}} \approx K_{n0}^2 \frac{\mu_{N0}^2}{n_0} \approx m_{a0}^2. \quad (9)$$

В общем случае, когда заданная точность определения азимутов неизвестна, при проектировании методики эталонирования следует исходить из «принципа гарантированного результата». Для повышения вероятности достижения максимально возможной точности определения азимутов следует, по возможности, максимально снизить составляющие СКП, относящиеся к процессу эталонирования. Этого можно добиться путем накопления избыточ-

ных измерений при эталонировании ГТ (снижение случайной составляющей) и путем обеспечения достаточной точности эталонного азимута.

Из исследований [5, 6] и работ [15, 16, 18] известно, что снижение СКП путем накопления избыточных измерений «окупается» до $\approx 0,5 m_{\text{гир}}$. Далее увеличение затрат времени (увеличение числа пусков) не приведет к значимому для конечного результата снижению СКП определения приборной поправки Δ и, как следствие, азимута a . Обширный опыт выполнения полевых и лабораторных эталонирований гиротеодолитов Ги-БЗ, ГТ-3, Gyromat 3000, выполненных в 29-м НИИ МО РФ, показывает, что снижение СКП до уровня $\approx 0,5 m_{\text{гир}}$ достигается при 12 пусках (приемах определения азимутов ГТ) и при дальнейшем увеличении числа пусков значительно не снижается. Для учета этого ограничения повышения точности при априорных расчетах рекомендуется использовать коэффициенты K [16–18].

Приведенные выше суждения позволяют составить алгоритм обоснования методики эталонирования гиротеодолита с заданной точностью.

Исходными данными для обоснования методики эталонирования гиротеодолита целесообразно принять точность m_a° , с которой впоследствии планируется определять азимуты направлений, а также точность $\mu_{\text{гир}}$ (СКП определения азимута одним пуском) самого эталонируемого прибора (гироскопического комплекта).

Три шага алгоритма могут быть выполнены независимо (параллельно) и должны заключаться в расчете директивной точности (СКП) m_{a0}° эталонного (контрольного) азимута, пригодного для эталонирования; в том числе следует рассчитать минимально требуемое число n_0^T пусков и приемов $n_{0\beta}^T$ геодезической привязки при эталонировании.

Важным ограничением методики являются рабочие допуски – допустимые расхождения между величинами, полученными из нескольких измерений. Необходимость применения рабочих допусков обусловлена нецелесообразностью выполнения большого числа измерений (для статистической обработки требуется, как правило, более 20 измерений) [7]. Это ведет к нерациональному (неоправданному) расходу операционных ресурсов, затрачиваемых для достижения цели – определение азимутов с заданной точностью.

В качестве служебного допуска удобно принять предельную ошибку W° [7]. Для установления ее значения обычно назначаются вероятности [7, 19]:

$$\begin{aligned} P\{-3m < a < 3m\} &= 0,997; \\ P\{-2,5m < a < 2,5m\} &= 0,988; \\ P\{-2m < a < 2m\} &= 0,955. \end{aligned} \quad (10)$$

Нетрудно заметить, что в первом случае только три ошибки из 1000 могут быть больше по модулю $3m$, во втором случае только 12 будут больше $2,5m$ и в третьем случае 45 ошибок превысят $2m$. В общем виде рабочий допуск возможно формализовать: $W^\circ \geq |x_1 - x_2|$, где x – результаты измерений. Критерий пригодности результатов измерений примет вид

$$G: \begin{cases} 1, \text{ при } W^\circ \geq |x_{n-1} - x_n|; \\ 0, \text{ при } W^\circ \leq |x_{n-1} - x_n|, \end{cases} \quad (11)$$

где 1 – пригодно;

0 – непригодно.

Для эталонирования ГТ с целью дальнейшего его применения при ориентировании с предельной (наивысшей) точностью целесообразно принять самый жесткий допуск

$$W^\circ \geq |x_1 - x_2| = 2m. \quad (12)$$

Для эталонирования ГТ с целью дальнейшего его применения при ориентировании с точностью среднего уровня целесообразно принять средний допуск

$$W^\circ \geq |x_1 - x_2| = 2,5m. \quad (13)$$

Применение рабочего допуска $W^\circ \geq 3m$ с большей вероятностью может привести к тому, что в обработку попадут грубые результаты.

Результаты измерений, разница $|x_{n-1} - x_n|$ которых имеет значение больше предельного W^δ , считаются грубыми и в обработку не принимаются.

Таким образом, алгоритм обоснования методики (рис. 1) эталонирования гиротеодолита с заданной точностью должен включать два основных блока:



Рис. 1. Алгоритм обоснования методики эталонирования гиротеодолита с заданной точностью

– три шага, которые могут быть выполнены независимо (параллельно): расчет директивной точности (СКП) m_{a0}^δ эталонного (контрольного) азимута, пригодного для эталонирования; расчет минимально требуемого числа n_0^T пусков ГТ и приемов n_{β}^T геодезической привязки при эталонировании;

– расчет служебных допусков: допустимого расхождения между приемами наблюдений при угловой привязке и допустимого расхождения между пусками.

Сам порядок действий методики эталонирования (порядок выполнения измерений при эталонировании) должен учитывать конструктивные особенности ГТ и реализовывать принцип определения астрономического азимута данным ГТ.

ПРИМЕР МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИБОРНОЙ ПОПРАВКИ ГИРОТЕОДОЛИТА С ЗАДАННОЙ ТОЧНОСТЬЮ

Современный парк ГТ класса точности 1-3" до недавнего времени полностью состоял из ГТ с механическими чувствительными элементами (ЧЭ) – гиромотора с ротором. Эти ГТ, несмотря на преимущества в точности определения азимутов направлений, имеют ряд недо-

статков, не позволяющих повысить моторесурс ЧЭ; кроме того, они достигли предела развития в точности определения азимута.

ГТ с ЧЭ в виде лазерного гироскопа до недавнего времени имели порог точности на уровне $0,5-1'$, что не могло удовлетворить требований к точностям геодезических работ. В 2019 году был разработан и проходил испытания статический лазерный гироскоп ЛГК ГЕКН 401233.003 ТУ. Такой ЛГК предназначен для определения астрономического азимута своего контрольного элемента. СКП значения азимута, полученного в течение не менее 10 минут измерений, при предварительном точном горизонтировании не превышает $2-5''$. Прибор имеет несколько конструктивных особенностей и реализует специальный алгоритм, позволяющий нейтрализовать ряд погрешностей, присущих ЛГК. Алгоритм нейтрализации подробно представлен в работе [20].

Кроме того, ЛГК ГЕКН 401233.003 ТУ обладает высокой средней наработкой на отказ, которая составляет не менее 5000 часов, а назначенный ресурс работы составляет не менее 10000 часов без проведения регламентных работ. Эти показатели существенно превышают показатели гироскопов (гиротеодолитов) геодезического класса точности, основанных на механических (роторных) гироскопах. Массогабаритные характеристики и требования к электропитанию ЛГК ГЕКН 401233.003 ТУ не превышают показателей современных высокоточных гироскопов. Поэтому в качестве примера методики эталонирования ГТ предлагается рассмотреть именно методику эталонирования ЛГК ГЕКН 401233.003 ТУ. За основу принята методика [4] эталонирования ГТ-3, который обладает наиболее близкими точностными характеристиками.

Содержание методики эталонирования ЛГК заключается в следующем.

Эталонирование ЛГК выполняют с целью определения его приборной поправки Δ – систематической разности между известным значением астрономического азимута a_0 исходного направления и значением азимута a этого же направления, полученного прибором. Значение поправки Δ затем используют для коррекции результатов измерений, выполняемых данным комплектом прибора.

Эталонирование ЛГК выполняют в следующих случаях:

- после получения прибора с завода-изготовителя;
- после ремонта приборов комплекта АГК или хранения более 1 года;
- при изменении температуры окружающего воздуха более чем на 35°C ;
- после выполнения каждых 50 программ определения азимута;
- после транспортировки ГТ от места аттестации на расстояние, превышающее 500 км по грунтовым дорогам и 1000 км – по шоссейным.

Перед началом эталонирования вводят нулевое значение поправки Δ .

Эталонирование ЛГК проводят по двум исходным направлениям, астрономические азимуты которых получены с СКП, не превышающей $1,5''$. В качестве исходных направлений могут использоваться стороны ГГС I класса. Поправка δA Лапласа для таких пунктов ГГС должна быть известна с СКП, не превышающей $0,5-1''$. На пункте аттестации первоначально измеряют теодолитом Т1А шестью круговыми приемами угол между сторонами ГГС, которые предполагается использовать в качестве исходных (эталонных). Расхождение измеренного угла с его принятым значением не должно превышать $6''$. Если расхождение превышает допуск, то аттестацию прибора по данным направлениям производить запрещается.

Аттестация гиротеодолита САГ включает $p = 6$ программ (12 пусков) определения азимутов исходных направлений с нулевой поправкой Δ для дальнейшего ориентирования с СКП $m_a = 2''$ и три программы (6 пусков) для дальнейшего ориентирования с СКП $m_a = 4''$.

Измерения проводят, как правило, в течение двух суток, в наиболее благоприятные для наблюдения часы. Программы определения азимута равномерно распределяют во времени, обеспечивая перерывы между двумя соседними программами, не менее 1 часа. Очередную программу определения азимута выполняют на новой установке гироскопа, отличающейся

от предыдущей на 90° . При этом обеспечивают соблюдение допусков $W_{\alpha}^{\delta} = 5''$ и $W_{\beta}^{\delta} = 10''$ для дальнейшего ориентирования с точностью СКП $m_{\alpha} = 2''$ и $m_{\beta} = 4''$ соответственно.

В каждом пуске вычисляют:

– средние значения углов между исходными сторонами и нормалью к зеркалу контрольного элемента (КЭ):

$$\beta'_{\text{ср}} = \frac{1}{6} \sum_{k=1}^6 \beta'_k = \frac{1}{6} \sum_{k=1}^6 (M_k^{A'} - M_k^{\text{КЭ}}),$$

$$\beta''_{\text{ср}} = \frac{1}{6} \sum_{k=1}^6 \beta''_k = \frac{1}{6} \sum_{k=1}^6 (M_k^{A''} - M_k^{\text{КЭ}}),$$

где k – номер приема измерения углов в данном пуске;

i – номер пуска при эталонировании;

M – отсчеты по лимбу теодолита в k -м приеме измерения направления на КЭ и исходные направления;

– значения азимутов исходных сторон, полученных эталонируемым ГТ с нулевой поправкой:

$$a'_{\text{гир}} = a'_{\text{гирКЭ}} + \beta'_{\text{ср}} \pm 180^\circ + \delta\gamma,$$

$$a''_{\text{гир}} = a''_{\text{гирКЭ}} + \beta''_{\text{ср}} \pm 180^\circ + \delta\gamma,$$

где $\delta\gamma$ – сближение меридианов;

– два значения поправки гиротеодолита:

$$\Delta'_i = a' - a'_{\text{гир}},$$

$$\Delta''_i = a'' - a''_{\text{гир}},$$

где a' , a'' – принятые значения астрономических азимутов исходных направлений.

Единичное значение приборной поправки Δ_j получают усреднением поправок Δ'_i , Δ''_i , Δ'_{i+1} , Δ''_{i+1}

За окончательное значение приборной поправки Δ принимают среднее значение из всех p программ (пусков), выполненных при эталонировании ГТ:

$$\Delta = \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p \Delta_j.$$

Результаты аттестации после проверки вычислений в журнале наблюдений оформляют в специальной ведомости (в две руки). В ведомости вычисляют приборную поправку Δ и СКП μ_{Δ} определения приборной поправки из одной программы по формуле

$$\mu_{\Delta} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^p v_j^2}{p-1}},$$

где $v_j = \Delta_j - \Delta$ – отклонение единичных значений поправки от ее окончательного (среднего) значения.

В случае выполнения условий эталонирования рассчитывают рабочее значение поправки путем усреднения поправок, полученных при предыдущей и данной аттестациях, и записывают его в долговременную память ГТ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный подход к обоснованию методики определения приборной поправки ГТ позволяет получать требования к точности исходной геодезической основы для выполнения эталонирования гиротеодолитов, числу выполняемых ими пусков и приемов геодезической привязки при эталонировании, а также рабочие допуски. Кроме того, приведенный матема-

тический аппарат позволяет выполнить проектирование методики для определения азимутов направлений с заданной точностью.

Исходными данными для обоснования методики являются требования к точности получения азимутов направлений, что позволяет подойти к обоснованию требований к определению приборной поправки гиротеодолита с позиции обеспечения заданного результата ориентирования.

Список используемых источников

1. Российская Федерация. Законы. Об обеспечении единства измерений N 102-ФЗ: федеральный закон [принят Гос. думой 26 июня 2008 г.] – URL: www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_77904/ (дата обращения: 20.19.2019).
2. Научно-методический подход к оцениванию сложных технических комплексов с учетом метрологического обеспечения / Я.Н. Гусеница, И.В. Дорожко, И.А. Кочалов, А.Б. Петухов // Труды МАИ. – 2018. – № 98. – С. 20.
3. Руководство по астрономо-геодезическим работам при топогеодезическом обеспечении войск. – М.: РИО ВТС, 1979. – Ч. 3: Гироскопическое ориентирование. – 224 с.
4. Технические указания по применению гиротеодолитов ГТ-3 при топогеодезическом обеспечении войск. – М.: РИО ВТС, 1991. – 53 с.
5. *Воронков Н.Н.* Гироскопическое ориентирование: учебник. – М.: ВИА им. В.В. Куйбышева, 1968. – 342 с.
6. *Воронков Н.Н., Кутырев В.В., Ашимов Н.М.* Гироскопическое ориентирование. – М.: Недра, 1980. – 295 с.
7. *Астапович А.В.* Теория математической обработки измерений: учеб. пособие. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2017. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ч. 1: Ошибки измерений. – 191 с.
8. *Гайворонский С.В., Цодокова В.В.* Алгоритм определения астрономического азимута оптико-электронным астровизиром // Материалы докладов XIV конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». – СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2012. – С.136–142.
9. Руководство по определению астрономо-геодезических и гравиметрических данных при топогеодезическом обеспечении войск. – М.: РИО ВТС, 1982. – Ч. 2: Астрономические и гравиметрические работы. – 427 с.
10. *Уралов С.С.* Курс геодезической астрономии: учебник. – М.: ВИА им. В.В. Куйбышева, 1971. – Ч. 2 [разд. 1, 2]. – 366 с.
11. *Уралов С.С.* Курс геодезической астрономии: учебник. – М.: ВИА им. В.В. Куйбышева, 1972. – Ч. 2 [разд. 3, 4]. – 400 с.
12. *Чернов И.В.* Модель интегрированной спутниково-гироскопической системы оперативного определения высокоточного азимута // Геодезия и картография. – 2017. – Т. 78, № 7. – С. 2–8.
13. Оценка достижимой точности определения азимута на коротком базисе с использованием спутниковых и геодезических средств / А.В. Шолохов, Н.И. Котов, С.Б. Беркович, А.Ю. Махаев // Геодезия и картография. – 2018. – Т. 79, № 6. – С. 2–8.
14. ГОСТ Р 8.885-2015. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Эталоны. Основные положения. – М.: Стандартинформ, 2019. – 7 с.
15. *Алексеев В.Ф., Левадный Ю.В., Чернов И.В.* Обоснование эмпирического коэффициента понижения точности гироскопических наблюдений // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2018. – Вып. 665. – С. 132–138.

16. Пат. 2696807 Способ определения коэффициента понижения априорной оценки точности определения азимута гиротеодолитом. Рос. Федерация : МПК G01C 1/02 / Чернов И.В.; заявитель и патентообладатель Чернов И.В. – № 2019100954; заявл. 10.01.19; опубл. 06.08.19, Бюл. № 22. – 3 с.

17. Пат. 2696808. Способ определения коэффициента понижения априорной оценки точности определения азимута гиротеодолитным комплектом. Рос. Федерация : МПК G01C 1/02 / Чернов И.В.; заявитель и патентообладатель Чернов И.В. – № 2019100953; заявл. 10.01.19 ; опубл. 06.08.19, Бюл. № 22. – 3 с.

18. *Чернов И.В., Петухов С.А.* Подход к определению эмпирического коэффициента понижения точности наблюдений гиротеодолитом // *Информация и космос.* – 2019. – № 3. – С. 132–135.

19. *Русяева Е.А.* Теория математической обработки геодезических измерений. – М.: МИИГАиК, 2016. – Ч. I: Теория ошибок измерений. – 56 с.

20. *Чернов И.В.* Повышение точности определения азимутов с использованием лазерных гироскопов // *Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка.* – 2016. – № 6. – С. 27–32.

Н.И. Алимов;
В.А. Власов,
кандидат техн. наук, доцент;
Н.В. Радионов,
доктор экономических наук, доцент;
кандидат техн. наук;
Е.К. Яхваров

МЕТОДИКА ПЛАНИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВОЙСКОВЫХ ЧАСТЕЙ КОСМИЧЕСКИХ ВОЙСК С УЧЕТОМ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ЦЕН

В статье рассматривается стратегия экономически активного формирования планов материально-технического обеспечения космических войск (КВ) материально-техническими средствами на контрактных условиях. Сформулированы два варианта постановки задачи выбора варианта организации материально-технического снабжения КВ. Предложена модификация задачи выбора варианта организации материально-технического снабжения КВ, связанная с упрощенными рациональными методами решения задач смешанного дискретно-непрерывного программирования.

Ключевые слова: материально-технические средства, технически полезные стратегии, стратегии инвестирования, метод экономического аналога, норматив эффективности.

ВВЕДЕНИЕ

В системе Вооруженных сил (ВС) России особую роль играют космические войска (КВ), которые решают три основные группы задач: информационное обеспечение действий ВС на театрах военных действий (ТВД), коммуникационное обеспечение управления войсками и оружием и ведение боевых действий в космосе и из космоса. При этом сами КВ постоянно нуждаются во всестороннем обеспечении процессов своего функционирования. Одним из видов обеспечения является материально-техническое обеспечение вооружения, эксплуатируемого КВ. Существенный экономический эффект при организации данного вида обеспечения позволит применить ресурсосберегающий подход, при котором планирование поставок технических материальных средств (ТМС) осуществляется с учетом фактических потребностей войск, а организация снабжения оптимизируется по критерию минимума затрат при гарантированном достижении требуемого уровня обеспеченности КВ.

В данной статье рассматривается один из конструктивных подходов к решению сложной технико-экономической задачи выбора стратегии инвестирования ограниченных финансовых ресурсов в создание системы материально-технического обеспечения КВ. Эту стратегию можно также назвать *стратегией экономически активного формирования планов материально-технического обеспечения КВ материально-техническими средствами (МТС) на контрактных условиях*.

Система обеспечения КВ МТС является сложной технико-экономической системой со структурой, которая может быть представлена иерархическим графом эшелонированной совокупности составных частей (поставщиков, путей поставки, промежуточных и конечных складов и конечных потребителей) [1].

Полагая, что функционирование системы обеспечения КВ МТС в целом зависит от функционирования всех ее составных частей, в качестве показателей эффективности системы обеспечения КВ МТС в целом можно выбрать вектор из пяти параметров-компонент $[\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5]$. Компоненты вектора имеют следующий смысл:

π_1 – показатель вероятности удовлетворения потребности в МТС потребителей нижнего уровня, эксплуатирующих вооружение КВ (показатель результативности системы);

π_2 – обобщенный показатель общего количества запасов МТС в системе (показатель продуктивности системы);

π_3 – показатель среднего времени хранения МТС в процессе доведения от производителя до потребителя (показатель первичной временной задержки);

π_4 – показатель среднего времени доставки необходимых МТС потребителю (оперативность реагирования системы обеспечения на всплески спроса, вызванные нестационарностью процесса потребления);

π_5 – экономический показатель затрат на обеспечение КВ МТС.

Для определенности показатель π_5 в простейшем случае представляется в виде набора затрат: $\pi_5 = \{C_{\text{МТС}}, C_{\text{тр}}, C_{\text{хр}}\}$. К этим затратам относятся следующие:

$C_{\text{МТС}}$ – затраты на создание запасов (закупки на все склады);

$C_{\text{тр}}$ – затраты на перемещение запасов, связанные с процессами движения МТС в системе;

$C_{\text{хр}}$ – затраты на обеспечение требуемых условий хранения МТС, включая потери стоимости находящихся на хранении МТС, обусловленные ухудшением их эксплуатационных свойств.

Альтернативы построения системы можно задать в виде блочной матрицы (индексной зависимости)

$$\pi = \left\{ [\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5]_{ij}, \quad i = \overline{1, M}, j = \overline{1, J_i} \right\},$$

где M – количество наименований номенклатуры МТС;

J_i – количество вариантов организации материально-технического обеспечения по каждой i -й номенклатуре.

Конкретный вид приведенной матрицы может быть получен, например, на основе логико-вероятностных математических моделей функционирования систем материально-технического обеспечения КВ, рассмотренных в [1].

Естественно предположить, что инвестирование определенной суммы $I_{\text{КВМТС}}$ финансовых средств в проведение комплекса мероприятий по созданию системы материально-технического обеспечения КВ должно быть согласовано с выбором таких показателей (построено в матрице π), которые удовлетворяли бы заданному критерию. Однако элементами матрицы π являются векторы. Поэтому критерий в этом случае можно построить одним из трех известных методов [1, 2]: с использованием принципа Парето, покомпонентно независимым векторным методом или методом свертки компонент в единый критерий.

Учитывая, что только *метод свертки* позволяет определить обобщенный по всей системе критерий оптимальности, далее рассматривается только этот метод. В данной работе предлагается специальный тип экономической (денежной) свертки, который позволяет выделить показатели одной и той же размерности, допускающие простое сложение без определения весовых коэффициентов. В результате можно существенно снизить влияние субъективной составляющей в аддитивной свертке, традиционно присутствующей в свертках разной размерности. В данном случае свертка производится на основе принципа масштабирования вариантов в каждой номенклатуре с учетом технико-экономического смысла выбранных компонент вектора показателей качества $[\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5]$. Для этого выполняется ряд действий:

- задается уровень масштаба вариантов по достижению заданного уровня результативности π_1 удовлетворения потребности в МТС всех мест хранения по требуемому значению $\pi_{1\text{ТРЕБ}}^{(i)}$ или по максимальному в строках матрицы π : $\max_{j_i} \pi_1^{(i j_i)}$;
- задается уровень масштаба по достаточности количества запасов в системе $\pi_2^{i j_i} \geq \pi_{2\text{ТРЕБ}}^i$;
- с учетом принятых уровней производится коррекция конкретных составляющих стоимостных и временных показателей качества вариантов обеспечения КВ МТС:

коррекция затрат на создание запасов:

$$C'_{\text{МТС}(i j_i)} = C_{\text{МТС}(i j_i)}(\pi_1^{(i j_i)}) + \begin{cases} \Delta C_{\text{МТС}(i j_i)}(\pi_{1\text{ТРЕБ}}^{(i)} - \pi_1^{(i j_i)}); \\ \Delta C_{\text{МТС}(i j_i)}\left(\max_{j_i} \pi_1^{(i j_i)} - \pi_1^{(i j_i)}\right); \end{cases} \quad (1)$$

коррекция затрат на транспортировку:

$$C'_{\text{ТР}(i j_i)} = C_{\text{ТР}(i j_i)}(\pi_1^{(i j_i)}) + \begin{cases} \Delta C_{\text{ТР}(i j_i)}(\pi_{1\text{ТРЕБ}}^{(i)} - \pi_1^{(i j_i)}); \\ \Delta C_{\text{ТР}(i j_i)}\left(\max_{j_i} \pi_1^{(i j_i)} - \pi_1^{(i j_i)}\right); \end{cases} \quad (2)$$

коррекция среднего времени хранения:

$$\pi_3^{(i j_i)} = \pi_3^{(i j_i)} + \begin{cases} \Delta \pi_3^{(i j_i)}(\pi_{1\text{ТРЕБ}}^{(i)} - \pi_1^{(i j_i)}); \\ \Delta \pi_3^{(i j_i)}\left(\max_{j_i} \pi_1^{(i j_i)} - \pi_1^{(i j_i)}\right); \end{cases} \quad (3)$$

коррекция среднего времени доставки:

$$\pi_4^{(i j_i)} = \pi_4^{(i j_i)} + \begin{cases} \Delta \pi_4^{(i j_i)}(\pi_{1\text{ТРЕБ}}^{(i)} - \pi_1^{(i j_i)}); \\ \Delta \pi_4^{(i j_i)}\left(\max_{j_i} \pi_1^{(i j_i)} - \pi_1^{(i j_i)}\right); \end{cases} \quad (4)$$

Коррекция затрат на хранение определяется с учетом риска изменения стоимости денег во времени. Если стоимость приведена к текущему моменту C , то риск затрат на промежутке времени $[0, t]$ определяется как

$$Risk = \int_0^t \frac{C}{(1+r)^t} \cdot \varphi_{\hat{r}}(t) dt. \quad (5)$$

Данную формулу можно переписать с учетом перехода от временной зависимости $\varphi_{\hat{r}}(t)$ к зависимости $\phi_{\hat{r}}(r)$:

$$Risk = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \frac{C'}{(1+r)^t} \varphi_{\hat{r}}(t) dt = C' \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} r(\rho) d\rho = \exp. \quad (6)$$

С учетом выражений (1)–(3) определяется коррекция затрат на хранение:

$$C'_{\text{ХР}(i j_i)} = \left[C_{\text{ХР}(i j_i)}(\pi_1^{(i j_i)}) + \begin{cases} \Delta C_{\text{ХР}(i j_i)}(\pi_{1\text{ТРЕБ}}^{(i)} - \pi_1^{(i j_i)}) \\ \Delta C_{\text{ХР}(i j_i)}\left(\max_{j_i} \pi_1^{(i j_i)} - \pi_1^{(i j_i)}\right) \end{cases} \right] \cdot \exp \left(\begin{matrix} \left(\pi_3^{(i j_i)} + \pi_4^{(i j_i)} \right) \\ \int_0^t r(t) dt \end{matrix} \right), \quad (7)$$

где $r(t)$ – интенсивность изменения стоимости денег во времени (либо темп инфляции);

$r(\rho)$ – функция интенсивности стоимости денег во времени.

Величины масштабных поправок $\Delta C_{\text{МТС}(i j_i)}$, $\Delta C_{\text{ТР}(i j_i)}$, $\Delta C_{\text{ХР}(i j_i)}$, $\Delta \pi_3^{(i j_i)}$, $\Delta \pi_4^{(i j_i)}$ определяются:

- 1) по нормативной документации или прайс-листам выбранных контрагентов;
- 2) в процессе тендерно-договорной работы с клиентами (в рыночных условиях – государственная контрактная система);
- 3) экспертным методом (например, по методике [1, 3]).

Полученная свертка (4) отражает новый взгляд на задачу выбора вариантов организации всей системы обеспечения КВ МТС. Действительно, если учесть, что сумма $C'_{\text{МТС}(i_{ji})} + C'_{\text{ТР}(i_{ji})}$ для любого варианта j_i характеризует текущие (инвестиционные) затраты на создание равноценных по техническим параметрам организаций обеспечения КВ МТС по данной номенклатуре, то параметр $C'_{\text{XP}(i_{ji})}$ характеризует уже неравноценные (в силу технических временных различий и общеэкономических изменений стоимости денег) будущие затраты на непосредственное снабжение потребителей КВ соответствующей номенклатурой МТС. Очевидно, что в принятой формализации сумма коррекций (1) и (2) по всему перечню номенклатур позволяет оценить выбранные варианты по критерию удовлетворения требований финансирования $I_{\text{КВМТС}}$. При этом выбор приемлемых вариантов может производиться одновременно по всем позициям номенклатуры МТС, так как технические показатели всех вариантов каждой номенклатуры оказываются равно полезными (принадлежащими одному и тому же паретовскому слою).

Следует также отметить, что в формуле (4) величина $r(t)$ характеризует рыночную неопределенность. Ее значение может быть задано либо с помощью стохастической имитационной модели, либо с помощью нечеткой модели по аналогии с [1, 3].

Введем ряд определений.

Определение 1. Под **стратегией $X(I)$ инвестирования средств I** в создание организации обеспечения КВ МТС понимается тройка:

$$\begin{aligned} X_{\langle M, J_{i\max} \rangle} &= \left[x_{(i_{ji})} = \begin{cases} 0, & i = \overline{1, M}, j = \overline{1, J_{i\max}} \\ 1, & \end{cases} \right]; \\ I(X_{\langle M, J_{i\max} \rangle}) &= E_{\langle M \rangle}^T \cdot (I_{\langle M, J_{i\max} \rangle} \otimes X_{\langle M, J_{i\max} \rangle}) \cdot E_{\langle J_{i\max} \rangle}; \\ \Delta M_{\text{МТС}}(X_{\langle M, J_{i\max} \rangle}) &= -E_{\langle M \rangle}^T \cdot (C_{\langle M, J_{i\max} \rangle} \otimes X_{\langle M, J_{i\max} \rangle}) \cdot E_{\langle J_{i\max} \rangle}. \end{aligned} \quad (8)$$

Под значением $x_{(i_{ji})}$ понимается конкретная (j_i -я, $j_i = \overline{1, \dots, J_{i\max}}$) выбранная альтернатива варианта обеспечения КВ i -й номенклатурой МТС, причем для однозначной определенности

$X_{\langle M, J_{i\max} \rangle} \cdot E_{\langle J_{i\max} \rangle} = E_{\langle M \rangle}$; $I(X_{\langle M, J_{i\max} \rangle}) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{J_{i\max}} I_{i_{ji}}(x_{i_{ji}})$ – это суммарные инвестиции в реализацию матрицы выбранных альтернатив $X_{\langle M, J_{i\max} \rangle}$.

Тогда $I_{\langle M, J_{i\max} \rangle} = \left[I_{i_{ji}}(x_{i_{ji}}) = C'_{\text{МТС}(i_{ji})} + C'_{\text{ТР}(i_{ji})}, x_{i_{ji}} \neq 0, i = \overline{1, M}, j = \overline{1, J_{i\max}} \right]$ – матрица инвестиционных потребностей всех альтернатив по всей номенклатуре МТС; а

$\Delta M_{\text{МТС}}(X_{\langle M, J_{i\max} \rangle}) = -\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{J_{i\max}} \Delta M_{i_{ji}}(x_{i_{ji}})$ – суммарная оценка потребностей системы обеспечения КВ МТС в будущих (ожидаемых) эксплуатационных расходах на хранение и транспортировку МТС конечным потребителям при текущей (настоящей) реализации матрицы выбранных альтернатив $X_{\langle M, J_{i\max} \rangle}$.

Будущие эксплуатационные расходы всех альтернатив по всей номенклатуре МТС будут представлять собой матрицу $C_{\langle M, J_{i\max} \rangle} = \left[\Delta M_{i_{ji}}(x_{i_{ji}}) = C'_{\text{XP}(i_{ji})}, x_{i_{ji}} \neq 0, i = \overline{1, M}, j = \overline{1, J_{i\max}} \right]$.

При этом $E_{\langle J_{i\max} \rangle}, E_{\langle M \rangle}$ – единичные векторы, $J_{i\max} = \max J_i$, \otimes – знак прямого произведения.

Определение 2. Под множеством χ *технически полезных стратегий* инвестирования средств в создание организации материально-технического обеспечения КВ понимается совокупность стратегий:

$$\chi = \left\{ \begin{array}{l} X = \langle X_{\langle M, J_{i\max} \rangle}; I(X_{\langle M, J_{i\max} \rangle}); \Delta M_{\text{МТС}}(X_{\langle M, J_{i\max} \rangle}) \rangle; \\ X_{\langle M, J_{i\max} \rangle} \cdot E_{\langle J_{i\max} \rangle} = E_{\langle M \rangle}; \{ I(X_{\langle M, J_{i\max} \rangle}), \Delta M_{\text{МТС}}(X_{\langle M, J_{i\max} \rangle}) \} \in \Delta \end{array} \right\}. \quad (9)$$

Здесь условие $\{ I(X_{\langle M, J_{i\max} \rangle}), \Delta M_{\text{МТС}}(X_{\langle M, J_{i\max} \rangle}) \} \in \Delta$ означает, что выражения (1)–(4) могут рассчитываться для подмножества Δ множества первоначально выбранных альтернатив, заданных матрицей π .

Определение 3. Под множеством $\chi_{\text{д}}(I_{\text{КВ МТС}})$ *допустимых стратегий* инвестирования средств в создание организации материально-технического обеспечения КВ понимается подмножество $\chi_{\text{д}}(I_{\text{КВ МТС}}) \subset \chi$ множества χ технически полезных стратегий, инвестиции в реализацию которых не превосходят заданной величины $I_{\text{КВ МТС}}$:

$$\chi_{\text{д}}(I_{\text{КВ МТС}}) = \left\{ \begin{array}{l} X = \langle X_{\langle M, J_{i\max} \rangle}; I(X_{\langle M, J_{i\max} \rangle}); \Delta M_{\text{МТС}}(X_{\langle M, J_{i\max} \rangle}) \rangle \subset \chi; \\ I(X_{\langle M, J_{i\max} \rangle}) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{J_{i\max}} I_{i j_i}(x_{i j_i}) \leq I_{\text{КВ МТС}} \end{array} \right\}. \quad (10)$$

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ

Пусть известна логико-вероятностная математическая модель функционирования организации материально-технического обеспечения КВ, представленная в виде множества альтернативных вариантов с параметрами, определенными по формулам (1)–(4).

Можно сформулировать два очевидных варианта постановки задачи выбора варианта организации материально-технического снабжения КВ.

Задача 1 (оптимизация эксплуатационных расходов в системе). Требуется: на множестве $\chi_{\text{д}}(I_{\text{КВ МТС}})$ допустимых стратегий инвестирования средств в создание организации материально-технического обеспечения КВ, определяемом выражением (7), найти такую стратегию $X^* \subset \chi_{\text{д}}(I_{\text{КВ МТС}})$, которая обеспечивает минимальный уровень ожидаемых будущих эксплуатационных расходов:

$$\begin{aligned} X^* &= \arg \max_{X \subset \chi_{\text{д}}(I_{\text{КВ МТС}})} \Delta M_{\text{МТС}}(X), \\ I(X^*) &= \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{J_{i\max}} I_{i j_i}(x_{i j_i}^*) \leq I_{\text{КВ МТС}}. \end{aligned}$$

Задача 2 (оптимизация инвестиционных ресурсов в системе). Требуется: на множестве χ всех технически полезных стратегий инвестирования средств в создание организации материально-технического обеспечения КВ, определяемом выражением (6), найти такую стратегию $X \subset \chi$, которая обеспечивает минимальное расходование инвестиционных ресурсов в

создание организации материально-технического обеспечения КВ при заданном уровне потребностей $\Delta M_{\text{КВ МТС}}$ в ожидаемых эксплуатационных расходах на хранение и транспортировку МТС конечным потребителям:

$$X^* = \arg \min_{X \in \chi} I(X) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{J_{i\max}} I_{i j_i}(x_{i j_i}),$$

$$\Delta M_{\text{МТС}}(X^*) \geq \Delta M_{\text{КВ МТС}}.$$

МЕТОДИКА ПОИСКА РАЦИОНАЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Сущность методики заключается в переходе от задачи целевой функции с различной размерностью и технико-экономическими ограничениями к задаче с единой стоимостной размерностью. Математически это выражается переходом от задачи с ограничениями к задаче безусловной. Используем традиционный прием Лагранжа – добавление ограничений к целевой функции.

Для задачи 1 квазилагранжиан имеет вид

$$\Lambda_1(X^*, \lambda) = \max_{\substack{X \in \chi \\ \lambda \geq 0}} [\Delta M_{\text{МТС}}(X) + \lambda \cdot (I_{\text{КВ МТС}} - I(X))]. \quad (11)$$

Для задачи 2 квазилагранжиан имеет вид

$$\Lambda_2(X^*, \psi) = \min_{\substack{X \in \chi \\ \psi \geq 0}} [I(X) + \psi \cdot (\Delta M_{\text{КВ МТС}} - \Delta M_{\text{МТС}}(X))]. \quad (12)$$

Основной переменной в выражениях (8), (9) является стратегия X . Здесь X – вектор с дискретными координатами, а переменные λ и ψ непрерывны. Отсюда задачи (8) и (9) следует отнести к задачам математического программирования смешанного дискретно-непрерывного типа. Для решения задач (8) и (9) используем *метод экономического аналога*.

Произведя в выражении (9) вычитание величины $I_{\text{КВ МТС}}$ и эквивалентную замену процедуры минимизации на максимизацию отрицательной величины, получим выражение для квазилагранжиана

$$\Lambda_2(X^*, \psi) = \max_{\substack{X \in \chi \\ \psi \geq 0}} [\psi \cdot \Delta M_{\text{МТС}}(X) + I_{\text{КВ МТС}} - I(X) - \psi \cdot \Delta M_{\text{КВ МТС}}].$$

Учитывая, что $\psi = \text{const} > 0$, исключим из процедуры максимизации $\psi \cdot \Delta M_{\text{КВ МТС}}$ (фактически нулевой величины), без потери общности, квазилагранжиан примет вид

$$\tilde{\Lambda}_2(X^*, \psi) = \max_{\substack{X \in \chi \\ \psi \geq 0}} \left[\Delta M_{\text{МТС}}(X) + \frac{1}{\psi} \cdot (I_{\text{КВ МТС}} - I(X)) \right]. \quad (13)$$

Выражения (8) и (10) становятся идентичными при $\lambda \equiv 1/\psi$. Таким образом, можно утверждать, что в данной модификации при решении задач 1 и 2 полностью исчезают различия в области принятия решения.

В технических задачах математического программирования бывает не вполне ясен физический смысл неопределенных множителей Лагранжа. Именно это в процессе решения затрудняет поиск начальных и последующих значений.

Определенные выше эксплуатационные и инвестиционные затраты $I(X)$ разнесены во времени. Финансируются вначале инвестиции в создание системы, и только после возникновения потребности в МТС финансируется их доставка потребителю. Учитывая изменение стоимости денег во времени [8], сложение величин (4) и $I(X)$ требует коррекции одной из них путем дисконтирования. С учетом преобразования (4) запишем функцию экономической эффективности инвестиций $E_{\text{Э}}$ в создание организации материально-технического обеспечения КВ как элементарную прибыль с учетом будущих доходов:

$$E_{\text{Э}} = \Delta M_{\text{МТС}}(X) \cdot \hat{D} - I(X), \quad (14)$$

где \hat{D} – случайная величина дисконтирования.

В выражении (11) величину $\Delta M_{\text{МТС}}(X)$ интерпретируем как дисконтированный денежный поток (будущий доход), получаемый вследствие рациональной эксплуатации системы, а величину $I(X)$ – как издержки, затраченные на реализацию выбранной стратегии X .

В экономической теории [3] для расчетов вместо случайной функции \hat{D} принято использовать детерминированную функцию стоимости денег во времени:

$$\text{либо } D = \frac{D_0}{(1+r)^n}, \text{ либо } D = D_0 \cdot e^{-r \cdot n}, \text{ либо } D = D_0 \cdot \frac{(1+r)^n - 1}{r \cdot (1+r)^n},$$

где $r \in [0,1]$ – оценка экономического риска (ставка банковского процента);

n – горизонт предсказания последствий возникновения случая оплаты эксплуатационных расходов;

D_0 – мультипликатор платежей (коэффициент усиления).

С учетом функции из (11) представим величину приведенных к текущему времени стоимостей:

$$E_{\text{Э1}} = \Delta M_{\text{МТС}}(X) + \frac{1}{D} \cdot (I_{\text{КВ МТС}} - I(X)),$$

$$E_{\text{Э2}} = [\Delta M_{\text{МТС}}(X) - \Delta M_{\text{КВ МТС}}] \cdot D - I(X).$$

При сравнении их с формулами (8) и (9) видно, что имеется явная эквивалентность технической и экономической задач

$$\max_{\substack{X \subset \chi \\ \lambda \geq 0}} [\Delta M_{\text{МТС}}(X) + \lambda \cdot (I_{\text{КВ МТС}} - I(X))] \Leftrightarrow \max_{\substack{X \subset \chi \\ r \geq 0}} E_{\text{Э1}}$$

при условии $D \equiv 1/\lambda$, либо технической и экономической задач

$$\min_{\substack{X \subset \chi \\ \psi \geq 0}} [I(X) + \psi \cdot (\Delta M_{\text{КВ МТС}} - \Delta M_{\text{МТС}}(X))] \Leftrightarrow \max_{\substack{X \subset \chi \\ r \geq 0}} E_{\text{Э2}}$$

при условии $D \equiv \psi$.

В выражении из работы [3] величина D отражает значение времени (выраженного в единицах периода n) окупаемости инвестиций $I(X)$ за счет получения будущих денежных потоков (доходов) $\Delta M_{\text{МТС}}(X)$. При этом обратная величина $1/D = e_H$ является **нормативом эффективности В.В. Новожилова** [5].

Так как при $r \rightarrow 0$ имеет место $D \rightarrow D_0$, а при $r \rightarrow \infty$ имеет место $D \rightarrow 0$, то можно использовать традиционный метод «седловой точки» для решения задач в виде формул (8) и (9).

Решение для выражения (9) заключается в следующем.

1. Задача (9) приводится к виду экономического аналога с «седловой точкой»:

$$\Lambda_1(X^*, r) = \min_{D \geq 0} \left(\max_{X \in \chi} [D(r | n) \cdot \Delta M_{\text{МТС}}(X) - I(X)] \right).$$

2. При заданном n осуществляется выбор некоторого минимального значения $r = r_0$, которое обеспечивает выполнение условия $I(X) > I_{\text{КВ МТС}}$. Выбор этого значения может быть произведен при заранее вычисленном значении $I_{\text{max}} = \sum_{i=1}^M I_{i \text{max}}$ и соответствующем ему $X(I_{\text{max}})$.

3. При заданном приращении $r = r_0 + \Delta r$ решается задача максимизации:

$$D(r) \cdot \Delta M_{\text{МТС}}(X) - I(X) \rightarrow \max_{X \in \chi}.$$

4. Действия пункта 3 повторяются, если полученное решение удовлетворяет условию $I(X) > I_{\text{КВ МТС}}$.

5. Для поиска наиболее точного решения используем метод последовательных приближений при выполнении условия $I(X) \leq I_{\text{КВ МТС}}$. Локально оптимальным решением задачи можно считать стратегию X^* для r^* , найденную из формулы (12). При этом только выполнение условия взаимной монотонности

$$I_{i j_{i-1}}(x_{i j_{i-1}}) \geq I_{i j_i}(x_{i j_i}), \Delta M_{i j_{i-1}}(x_{i j_{i-1}}) \leq \Delta M_{i j_i}(x_{i j_i}) \quad \forall i, j_i$$

может гарантировать получение глобального оптимального решения исходной задачи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрена содержательная и математическая постановка задачи обоснования инвестиций в создание системы материально-технического обеспечения КВ. На основе оптимальной стратегии инвестирования средств в обеспечение эффективности функционирования системы предложена модификация исходной задачи.

Результатом решения задачи с $M - 1$ номенклатурой является оптимальное значение норматива эффективности В.В. Новожилова e_H^* . В задаче не требуется производить полный перерасчет при «подключении» к инвестиционному процессу в рамках выделенных средств $\Delta I_{\text{КВ}}$ M -й номенклатуры с разработанными для нее вариантами инвестиционных вложений $I_{M j_M}(x_{M j_M})$ и соответствующими эксплуатационными затратами. Необходимо определить номер l_N варианта, для которого выполняется неравенство

$$\frac{I_{M j_M}(x_{M j_M})}{\Delta M_{M j_M}(x_{M j_M})} < e_H^*.$$

Необходимо отметить значение рассмотренного в статье преобразования исходной задачи оптимального управления. Важным преимуществом этого подхода является возможность учёта инвестиционных средств при решении задачи выбора оптимальной стратегии.

Список используемых источников

1. *Мионов А.Н.* Теоретические основы и методы многомодельного прогнозирования долговечности сложных военно-технических систем космического назначения. – МО РФ, 2000. – 430 с.
2. *Новожилов В.В.* Проблемы измерения затрат и результатов при оптимальном планировании. – М.: Наука, 1972. – 434 с.
3. *Радионов Н.В.* Модели эффективности инвестиций и кредитования. Основы финансового анализа. – СПб.: Наука, 2005. – 600 с.
4. *Новегно Л., Аскулай Э.* В перспективе: роль оценки безопасности и управление риском // Бюллетень МАГАТЭ. – 1987. – Т. 29, № 2. – С. 39–45.
5. *Олейников К.М.* Защита имущественных интересов предприятия // Вопросы экономики. – 2002. – № 1. – С. 146–150.
6. *Адамчук Н.А., Алешин Д.А.* Управление рисками предприятий и страхование // Управление рисками. – 2002. – №1. – С. 32–39.
7. Введение в страхование: учеб. пособие. – М.: Финансы и статистика, 1999. – 288 с.
8. *Човушян Э.О., Сидоров М.А.* Управление риском и устойчивое развитие: учеб. пособие. – М.: Изд-во РЭА им. Г.В. Плеханова, 1994. – 528 с.
9. *Москалец А.П.* Правовые средства минимизации и предупреждения ущерба от чрезвычайных ситуаций в России и США. – М.: ВНИИ ГОЧС, 2001. – 168 с.
10. *Резников Б.А.* Методы и алгоритмы оптимизации на дискретных моделях сложных систем. – Л.: ВИКИ им. А.Ф. Можайского, 1983. – 250 с.

Н.Ф. Аверкиев,
доктор техн. наук, профессор;
А.В. Кульвиц,
кандидат техн. наук, доцент;
А.Ю. Хасанов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТЕЙ СТОЛКНОВЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПРИ ИХ ГРУППОВОМ ВЫВЕДЕНИИ

Исследован вопрос возможности столкновения космических аппаратов (КА) при их групповом выведении на орбиту, а также рассчитаны соответствующие вероятности. Приведен анализ зависимости вероятности столкновения КА от параметров опорной орбиты, с которой осуществляется разведение КА.

Ключевые слова: космический аппарат, столкновение космических аппаратов, групповое выведение.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все чаще различные задачи с использованием космических средств решаются не одиночными КА, а целыми группами (так называемые формации, кластеры). Например, при решении задачи определения местоположения источника радиоизлучения (ИРИ) одним из эффективных методов является разностно-дальномерный метод, который основан на измерении разности дальностей от ИРИ до нескольких КА [1, 2]. Данный метод требует одновременной регистрации поступающего от ИРИ сигнала сразу несколькими КА [3]. Одним из вариантов решения задачи определения местоположения ИРИ является развертывание на орбите вероятностной системы КА [4]. Под вероятностной системой КА понимается группировка КА, не требующая сохранения баллистической структуры и выполняющая единые целевые задачи [5].

Развертывание вероятностной системы КА можно осуществить пуском одной или нескольких ракет-носителей (РН) с группой КА, размещенных в капсуле (на платформе) на заданную (опорную) орбиту. При групповом отделении от капсулы (платформы) каждому КА придается заданный импульс скорости в заданном направлении, таким образом изменяются положение и геометрия орбит относительно опорной орбиты. В соответствии с импульсной теорией [6] при одновременном отделении КА от капсулы (платформы) у всех орбит будет как минимум одна общая точка. Несмотря на малые, по космическим меркам, размеры КА, вероятность столкновения двух КА все равно существует.

В работе исследуются вероятности столкновений, а также опасных сближений КА в течение срока их активного существования.

УСЛОВИЕ СТОЛКНОВЕНИЯ ДВУХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПРИ ОДНОВРЕМЕННОМ ОТДЕЛЕНИИ ОТ КАПСУЛЫ (ПЛАТФОРМЫ)

Рассмотрим условие, при котором столкнутся два КА, при этом будем полагать, что они являются материальными телами в форме шара и движутся в центральном гравитационном поле Земли без учета влияния атмосферы. Изначально КА-1 и КА-2 находятся неразрывно в одной связке на опорной орбите. В определенный момент времени КА-1 и КА-2, получив импульсы скорости ΔV_1 и ΔV_2 в заданных направлениях, отделяются от капсулы (платформы), и далее каждый КА будет двигаться по своей орбите.

Рассмотрение условия столкновения КА-1 и КА-2 проведено при следующих расчетных условиях:

- КА представляют собой шары с одинаковыми радиусами, равными $R_{КА}$;
- геометрические элементы орбит КА-1 $\{p_1, e_1\}$ и КА-2 $\{p_2, e_2\}$, а также опорной орбиты $\{p_0, e_0\}$ известны;
- движение КА – невозмущенное;
- срок активного существования КА равен $T_{сущ}$;
- отделение КА осуществляется в плоскости опорной орбиты.

Поскольку отделение КА осуществляется в плоскости опорной орбиты, точек пересечения двух орбит, в общем случае, будет две. При значениях угла $\epsilon = 0^\circ$ и $\epsilon = 180^\circ$ точка пересечения будет одна – точка, в которой было произведено отделение КА [6]. На рис. 1 представлены варианты орбит, в зависимости от угла ϵ , отсчитываемого от направления вектора скорости V_0 капсулы (платформы) до вектора импульса скорости ΔV отделяемого КА, а значком \otimes обозначены места пересечений орбит КА.

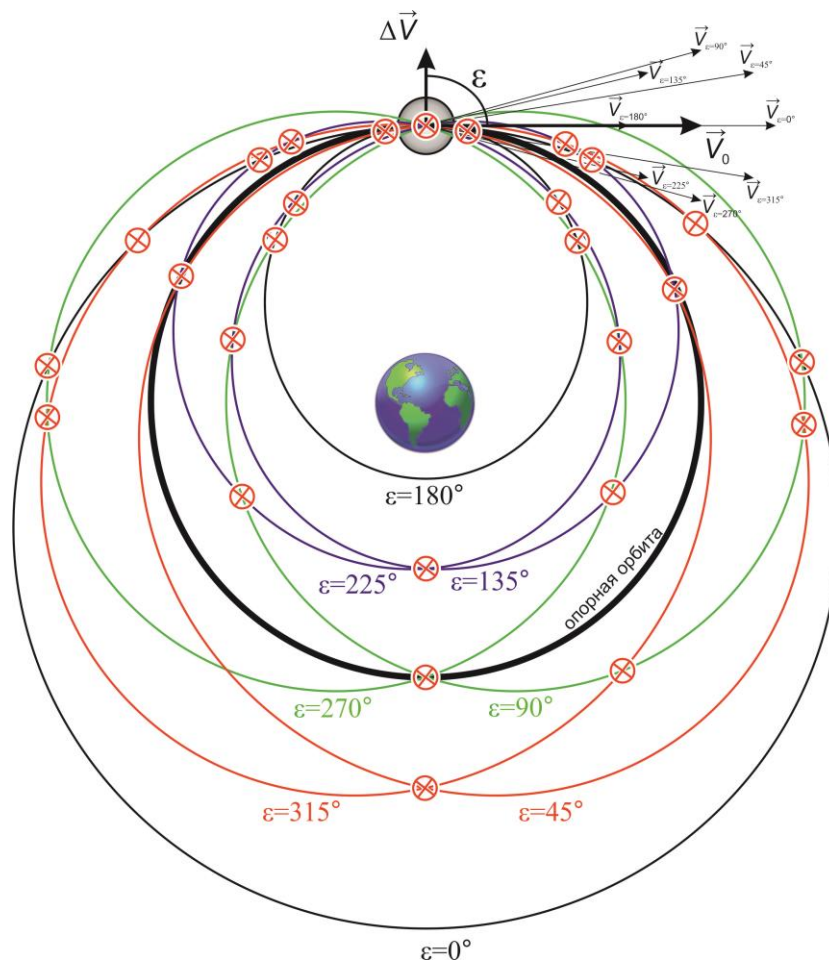


Рис. 1. Варианты орбит при отделении КА с различными значениями угла ϵ , отсчитываемого от направления вектора скорости V_0 капсулы (платформы) до вектора импульса скорости ΔV отделяемого КА

Для КА, имеющих форму шара, условие, при котором столкнутся два КА, можно задать следующим образом (рис. 2):

$$l_{12} < 2R_{КА}, \tag{1}$$

где l_{12} – длина дуги эллипса между центрами масс КА-1 и КА-2.

Под опасным сближением двух КА понимается такая ситуация, когда расстояние между центрами масс КА r_{12} меньше заданного значения $D_{\text{зад}}$. Заданные значения обуславливают некоторую вероятность столкновения сближающихся КА и определяются исходя из требований к недопущению столкновений в космосе

$$r_{12} < D_{\text{зад}}. \quad (2)$$

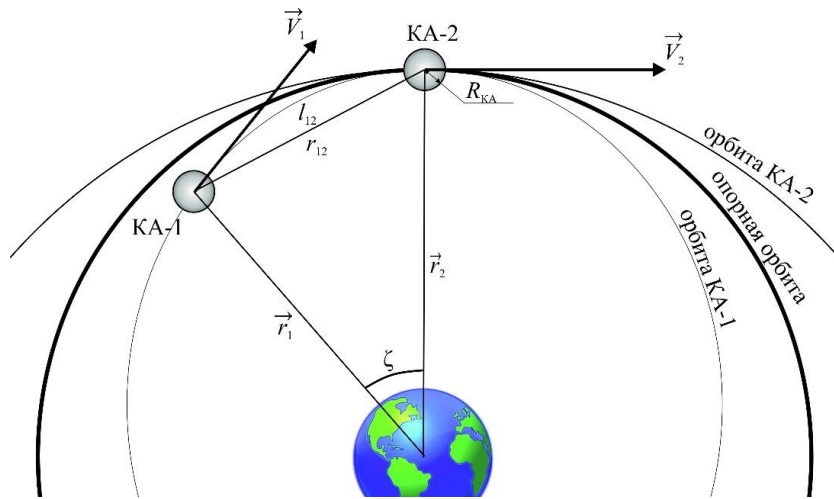


Рис. 2. Схема взаимного расположения КА-1 и КА-2

Для расчета времени, через которое произойдет столкновение КА-1 и КА-2, необходимо определить их взаимное положение в момент, когда в точке пересечения находится один из КА. Условие столкновения КА-1 и КА-2 проверяется в каждой точке пересечения орбит на каждом витке.

Чтобы найти длину дуги эллипса l_{12} между центрами масс КА-1 и КА-2, необходимо определить значения радиуса-вектора КА-1 r_1 и угла ζ , образованного радиусами-векторами r_1 и r_2 , в момент столкновения КА. Для этого необходимо решить такую систему уравнений:

$$\begin{cases} r_1 = \frac{p_1}{1 + e_1 \cos \zeta} \\ r_{12}^2 = r_1^2 + r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos \zeta \end{cases} \quad (3)$$

Длина дуги эллипса l_{12} от КА-1 до КА-2 рассчитывается с помощью определенного интеграла

$$l_{12} = \int_0^{\zeta} \sqrt{a_1^2 \sin^2 l + b_1^2 \cos^2 l} dl, \quad (4)$$

где a_1 – большая полуось орбиты КА-1,

$$a_1 = \frac{p_1}{1 - e_1^2};$$

b_1 – малая полуось орбиты КА-1,

$$b_1 = \frac{p_1}{\sqrt{1 - e_1^2}}.$$

Поскольку расстояние $2R_{\text{КА}}$ КА преодолевает менее чем за десятые доли секунды, изменение скорости при движении КА-1 по дуге эллипса от КА-1 до КА-2 является незначительным.

Таким образом, расстояние l_{12} , пройденное КА-1, определится по формуле

$$l_{12} = V_1 \Delta t_{12}. \quad (5)$$

Тогда, используя формулу (5), условие, позволяющее рассчитать разницу во времени прохождения точки пересечения орбит КА-1 и КА-2, будет выглядеть следующим образом:

$$\Delta t_{12} < \frac{l_{12}}{V_1}. \quad (6)$$

Так, например, для следующих исходных данных: $R_{КА} = 0,01$ км; $r_0 = 6671,2$ км; $e_1 = 0,002675$; $e_2 = 0$, $p_1 = 6689,045$ км; $p_2 = 7171,2$ км; угол ζ будет равен $0,0001718^\circ$; скорость КА-1 $V_1 = 7,74$ км/с; длина дуги $l_{12} = 0,020057$ км. Время Δt_{12} , за которое КА-1 пройдет расстояние l_{12} , будет составлять

$$\Delta t_{12} = \frac{l_{12}}{V_1} = 0,00259 \text{ с.}$$

Таким образом, для каждого витка проверяется условие (6), выполнение которого будет означать, что КА-1 и КА-2 столкнутся.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГРУППОВОГО ВЫВЕДЕНИЯ КА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ИХ СТОЛКНОВЕНИЯ

Использование вышеприведенного подхода к определению условий столкновения КА позволяет провести моделирование и рассчитать время, через которое КА столкнутся.

Направление импульса скорости $\Delta \vec{V}_i$ для каждого i -го отделяемого КА задается и определяется углом ε_i , отсчитываемым от направления вектора скорости V_0 капсулы (платформы), что показано на рис. 3. Будем полагать, что величина отклонения от значения импульса скорости $\Delta \vec{V}_i$ подчинена нормальному закону распределения, а значения углов ε_i равномерно распределены на промежутке $[0; 2\pi]$ с шагом $\frac{2\pi}{N_{КА}}$ [7]. В результате после получения импульса скорости формируется множество орбит отделяемых КА, имеющих свои направления и значения величины вектора скорости \vec{V}_i , $i = 1, \dots, N_{КА}$.

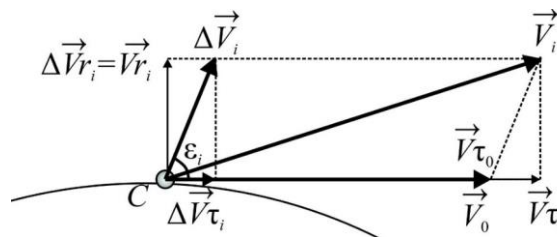


Рис. 3. Определение величины скорости КА при отделении от капсулы (платформы)

Величина скорости V_i КА при отделении от капсулы (платформы) определится по формуле

$$V_i = \sqrt{V_{\tau_i}^2 + V_{r_i}^2}, \quad i = 1, \dots, N_{КА}, \quad (7)$$

где V_{τ_i} – трансверсальная составляющая скорости V_i

$$V_{\tau_i} = V_{\tau_0} + \Delta V_i \cos \varepsilon_i; \quad (8)$$

V_{r_i} – радиальная составляющая скорости V_i ,

$$V_{r_i} = V_{r_0} + \Delta V_i \sin \varepsilon_i. \quad (9)$$

Для определения времени, через которое произойдет столкновение КА, необходимо знать значения периодов обращения КА T_i , которые можно рассчитать по следующей формуле:

$$T_i = 2\pi \frac{a_i^{3/2}}{\sqrt{\mu}}, \quad (10)$$

где μ – гравитационная постоянная Земли;
 a_i – большая полуось орбиты i -го КА, определяемая формулой

$$a_i = \frac{r_0}{2(1 - \frac{V_i^2}{V_{\text{пар}}^2})}. \quad (11)$$

Моменту столкновения будет соответствовать определенное количество витков одного из КА – k_i . Время T_C , через которое произойдет столкновение, рассчитывается следующим образом:

$$T_C = k_i T_i. \quad (12)$$

Для определения момента столкновения КА необходимо перебрать все возможные сочетания двух КА из всей выводимой на орбиту группы КА. Для каждого сочетания i -го и j -го КА по формуле (12) рассчитывается время столкновения T_C . В тех случаях, когда $T_C \leq T_{\text{сущ}}$, определяется количество таких столкновений – N_C .

В результате моделирования группового отделения КА рассчитывается вероятность их столкновения, для чего проводится m испытаний. Для каждого n -го испытания определяется количество столкновений N_C в течение срока активного существования $T_{\text{сущ}}$.

Вероятность столкновения КА по результатам m экспериментов определится по формуле [7]

$$P = \frac{\sum_{n=1}^m N_{C_n}}{m}. \quad (13)$$

Интервал для проведения испытания берется равным сроку активного существования КА – $T_{\text{сущ}}$. При увеличении интервала проведения испытаний увеличится также и вероятность столкновения P . График зависимости вероятности столкновения КА P от интервала прогнозирования движения КА при $N_{\text{КА}} = 100$, $H_0 = 628,8$ км представлен на рис. 4.

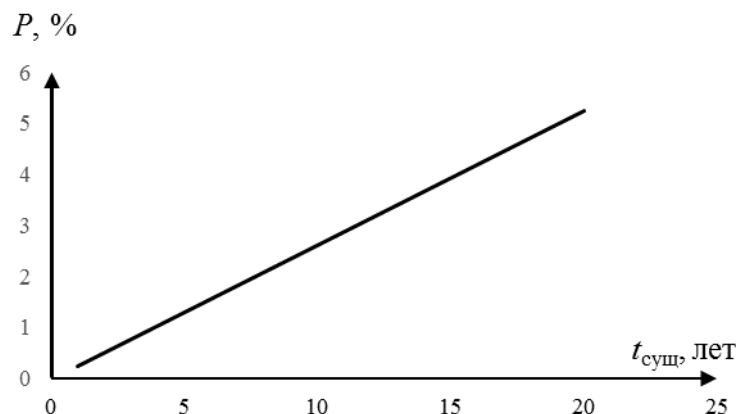


Рис. 4. График зависимости вероятности столкновения космического аппарата P от интервала прогнозирования его движения

Очевидно, что при увеличении количества отделяемых КА $N_{КА}$ вероятность столкновения КА P также возрастает, однако в данном случае зависимость нелинейная (рис. 5). График представлен при $t_{сущ} = 5$ лет, $H_0 = 628,8$ км.

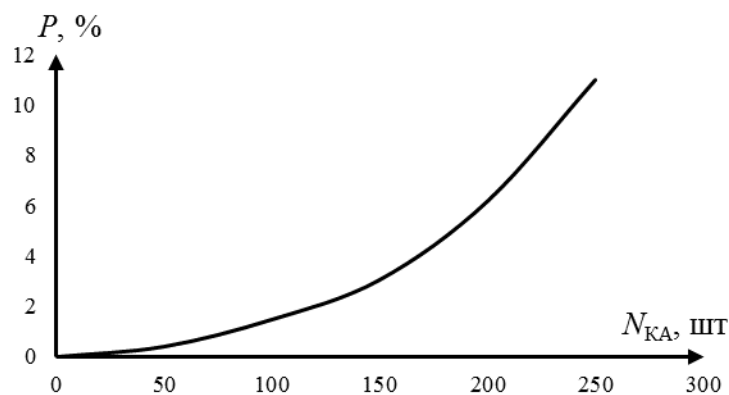


Рис. 5. График зависимости вероятности столкновения космического аппарата P от их количества

График зависимости вероятности столкновения КА P от высоты опорной орбиты H_0 при $t_{сущ} = 5$ лет, $N_{КА} = 100$ представлен на рис. 6.

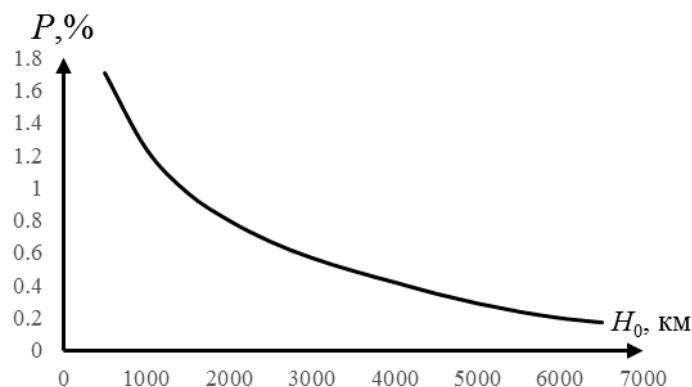


Рис. 6. График зависимости вероятности столкновения КА P от высоты опорной орбиты H_0

Исследование зависимости вероятности столкновения КА P от величины импульса ΔV показало, что значение вероятности столкновений практически не меняется, поскольку $\Delta V \ll V_0$, и геометрические характеристики орбит меняются незначительно. При отделении КА в плоскости орбиты вероятность столкновения КА больше примерно в 6 раз по сравнению со случаем, когда линия апсид опорной орбиты не совпадает с линией апсид вновь сформированных орбит. Вероятность столкновения в этом случае возрастает за счет появления вторых точек пересечения орбит КА.

Анализ моделирования процесса разведения КА для заданных расчетных условий с высотой опорной орбиты $H_0 = 628,8$ км при количестве КА $N_{КА} = 100$ показал, что вероятность столкновения двух КА составит $P = 9,23\%$, из них вероятность столкновения в точке расстыковки $P_0 = 1,44\%$.

На рис. 7 представлена диаграмма с процентным соотношением столкновений и опасных сближений КА.

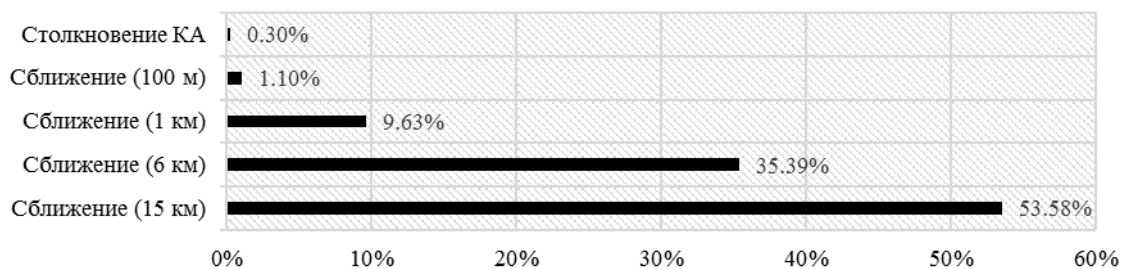


Рис. 7. График процентного соотношения столкновений и опасных сближений одновременного разведения КА от капсулы (платформы)

Количество столкновений и опасных сближений для $N_{КА} = 100$ приведено в табл. 1. Количество возможных комбинаций двух КА из 100 КА равно 4950.

Таблица 1
Количество опасных сближений (столкновений)
для $N_{КА}=100$

Столкновение КА	457
Сближение 100 м	1701
Сближение 1 км	14663
Сближение 6 км	51069
Сближение 15 км	78923

Результаты, полученные в ходе моделирования группового отделения КА при развертывании систем КА, могут быть использованы для определения возможности и целесообразности подхода к развертыванию вероятностных систем КА, предполагающих выведение группы КА одной или несколькими ракетами-носителями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При групповом выведении КА существует опасность их столкновения в течение срока активного существования при условии, если не будет произведена необходимая коррекция орбит КА.

При увеличении количества КА, одновременно отделяющихся от капсулы (платформы), вероятность столкновения возрастает нелинейно, а при увеличении высоты опорной орбиты вероятность столкновения нелинейно снижается за счет увеличения периода обращения КА. Величина импульса скорости, придаваемого при отделении КА, не влияет на вероятность столкновения.

Список используемых источников

1. Оценка координат источника радиоизлучения на основе решения линеаризованной системы уравнений разностно-дальномерного метода / И.В. Гринь, Р.А. Ершов, О.А. Морозов, В.Р. Фидельман // Известия высших учебных заведений. Технические науки. – 2014. – № 4 (32). – С. 71–81.

2. Айтмагамбетов А.З., Бутузов Ю.А., Кулакаева А.Е. Математические модели для определения координат источников радиоизлучений в системах радиомониторинга на базе

низкоорбитальных космических аппаратов // Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт. – 2016. – Т. 10, № 1. – С. 73–76.

3. *Севидов В.В., Чемаров А.О.* Определение координат спутников-ретрансляторов в алгоритме разностно-дальномерного метода геолокации // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – №3. – СПб.: ЛЭТИ. 2015. – С. 41–47.

4. *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. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2018. – Вып. 665. – С. 157–166.

5. Баллистические основы проектирования ракет-носителей и спутниковых систем / Н.Ф. Аверкиев, С.А. Власов, С.А. Богачёв и др. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2017. – 302 с.

6. *Власов С.А., Кульвиц А.В., Скрипников А.Н.* Теория полета космических аппаратов. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2018. – 412 с.

7. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей: учебник. – 11-е изд., стер. – М.: КНОРУС, 2010. – 664 с.

М.А. Александров,
кандидат техн. наук;
А.О. Воложинский
АО «Корпорация СПУ – ЦКБ ТМ», г. Москва;
Е.П. Минаков,
доктор техн. наук

МОДЕЛИ ОЦЕНИВАНИЯ ПРОГНОЗНОЙ ВЕРОЯТНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОРБИТАЛЬНЫХ ГРУППИРОВОК КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ЗЕМЛЕОБЗОРА ПО ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫМ ОБЛАСТЯМ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЕЙСТВИЙ ГРУППИРОВОК СИЛ ФЛОТА

Работа посвящена оцениванию прогнозной вероятности успешного применения космических аппаратов землеобзора и их орбитальных группировок по областям, расположенным на поверхности Земли, на заданных интервалах времени. Излагаются подходы к моделированию пространственного положения областей действий группировок сил флота, оцениванию их покрытия полосами обзора космических аппаратов землеобзора. Для оценивания прогнозной вероятности применения орбитальных группировок космических аппаратов землеобзора приводятся математические зависимости для определения указанной вероятности и пример для ее оценивания.

Ключевые слова: космический аппарат землеобзора, прогнозная вероятность применения, пространственно-временная область, зона обзора космического аппарата, полоса обзора космического аппарата.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из способов оценивания и визуализации эффектов от применения космических аппаратов землеобзора (КАЗ): дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), связи, навигации и ряда других, и их орбитальных группировок (ОГ) является их представление в виде специальных электронных карт на мониторах ПЭВМ, табло коллективных средств, бумажных носителях информации и т.д. В соответствии с задачами, решаемыми группировками сил флота (ГСФ), эти электронные карты должны отображать данные по прогнозным эффектам применения как отечественных ОГ, так и ОГ противника. Прогнозные электронные карты, являясь инструментом поддержки принятия решений, содержат данные об априорных характеристиках применения ОГ КАЗ в интересах информационного обеспечения действий ГСФ по заданным пространственно-временным областям (ПРВО), расположенным на поверхности Земли и в акваториях ее морей и океанов (на театрах военных действий, операционных и тактических направлениях и т.д.). Влияние множества случайных факторов, возникающих при применении КАЗ: условий обстановки и характеристик действий ГСФ, характеристик, пассивно формирующих условия применения ОГ КАЗ, и характеристик объектов, активно противодействующих достижению цели их применения, позволяет целесообразно использовать в качестве основного показателя эффективности применения указанных ОГ вероятности достижения соответствующих результатов, что делает актуальным решение научной задачи разработки моделей ПРВО, оценивания покрытия квадратов ПРВО полосами обзора КАЗ и определения вероятностей успешного применения КАЗ и соответствующих ОГ по этим областям.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ОБЛАСТИ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЕЙСТВИЙ ГРУППИРОВОК СИЛ ФЛОТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОРБИТАЛЬНЫХ ГРУППИРОВОК КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ЗЕМЛЕОБЗОРА

Планирование применения КАЗ и оценивание соответствующих эффектов в интересах информационного обеспечения действий ГСФ целесообразно осуществлять по так называемым ПРВО. В общем случае под ПРВО ($A_{\text{прво}_i}$) понимается замкнутая по положению и времени пространственная область, состоящая из множества точек, расположенных на поверхности материковой части Земли, в ее воздушном пространстве, Мировом океане и/или в ОКП, в которой (по которой, из которой) осуществляется функционирование какой-либо i -й системы ($\Pi_{\text{прво}_i}$) и которой сопоставлено соответствующее время (множество времен существования ПРВО) ($T_{\text{прво}_i}$):

$$A_{\text{прво}_i} = \Pi_{\text{прво}_i} \times T_{\text{прво}_i},$$

где \times – символ декартова произведения множеств.

ПРВО среди объектов материального мира можно выделить как некоторую целостность – систему, предназначенную для решения задач функционирования в ней i -й системы. В этой связи ПРВО представляют собой совокупность пространственно-временных объектов, называемых в дальнейшем элементами ПРВО, находящихся в отношениях и связях друг с другом и с окружающей средой [1]. При объединении этих объектов в ПРВО она приобретает специфические *эмерджентные* свойства, не присущие ни одному из них и превосходящие по составу сумму свойств составляющих их элементов. Для сферического прямоугольника дополнительно должно выполняться условие попарного неравенства дуг, прилежащих к одной вершине (рис. 1).

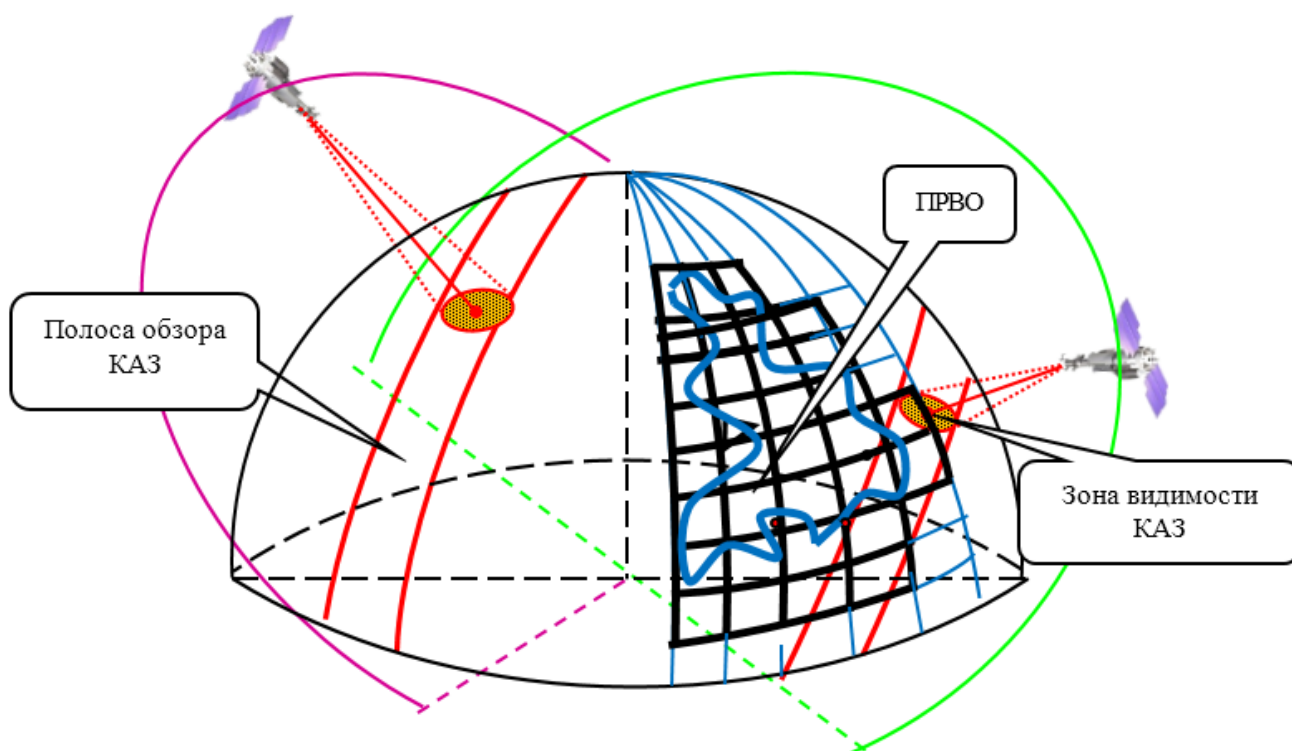


Рис. 1. Вид пространственного положения ПРВО

ПРВО информационного обеспечения действий ГСФ формируются в Гринвичской системе отсчета (ГрСО) и вращаются вместе с Землей относительно Абсолютной гелиоцентрической системы отсчета [2], в которой задаются параметры движения КАЗ. В случае использования модели Земли в виде шара с равномерным распределением масс они представляют собой сферические фигуры, имеющие сложную конфигурацию. В этой связи в качестве множества точек положения ПРВО целесообразно рассматривать какие-либо сферические геометрические фигуры: круги, треугольники и/или квадраты. Наиболее гибким является аппроксимация ПРВО информационного обеспечения действий ГСФ совокупностью равноразмерных или неравноразмерных сферических квадратов или сферических прямоугольников (реже – сферических треугольников). Здесь под сферическим квадратом (в дальнейшем – квадратом) понимается объект, расположенный на сфере и состоящий из множества точек, ограниченных четырьмя дугами, образующими замкнутую линию, имеющих четыре точки пересечения (вершины квадрата) и одинаковые угловые размеры указанных дуг, когда одна пара противоположных дуг принадлежит меридианам (дуги большого круга), другая пара – параллелям (дуги малых кругов).

МОДЕЛИ ОЦЕНИВАНИЯ ПОКРЫТИЯ КВАДРАТОВ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ОБЛАСТЕЙ ПОЛОСАМИ ОБЗОРА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ЗЕМЛЕОБЗОРА

На прогнозные характеристики применения КАЗ и их группировок помимо положения и времени, отводимого на решение задач информационного обеспечения действий ГСФ в ПРВО, существенное влияние оказывают баллистические и тактико-технические характеристики (ТТХ) этих средств. При проведении оперативно-тактических расчетов и оценивании эффективности применения КАЗ в дополнение к ранее сделанным допущениям по модели Земли могут быть приняты допущения о моделировании движения в рамках Кеплеровской теории и ориентации осей бортовой специальной аппаратуры КАЗ в надир [2].

К исходным данным для оценивания покрытия квадратов ПРВО полосами обзора КАЗ могут быть отнесены:

1) параметры движения z -го КА: высота перигея – H_{nz} ; высота апогея – H_{az} ; наклонение – i_z ; аргумент широты перигея – w_z ; время прохождения перигея – t_{nz} ; долгота выхода на экватор Земли на начальном витке – l_{z0} ; соответствующее время – t_{z0} ;

2) ТТХ КА: угол полураствора бортовой аппаратуры – g_z ; вероятность выполнения разового цикла применения – P_{1z} ;

3) пространственно-временные характеристики ПРВО: номера ее аппроксимирующих квадратов; времена начала T_n и конца T_k применения КА (ОГ) по ПРВО, $DT_3 = T_k - T_n$; вероятность успешного метеопрогноза по ПРВО при принятии решения на применение по ней КА ОЭР – P_2 . Значения вероятностей P_{1z} и P_2 определяется статистически по результатам ЛКИ, эксплуатации КА или путем моделирования.

В рамках сделанных допущений могут быть рассмотрены три основных модели оценивания покрытия квадратов ПРВО полосами обзора КАЗ:

1) модель, включающая в себя зависимости для определения координат каждой из подспутниковых точек – соответствующего углового размера зоны обзора КАЗ, углового расстояния между каждой вершиной каждого квадрата ПРВО и подспутниковой точкой; в случае, если указанное угловое расстояние меньше углового размера зоны обзора КАЗ по каждой вершине квадрата, то считается, что он целиком покрыт полосой обзора КАЗ;

2) модель, включающая в себя зависимости для определения межвиткового расстояния КАЗ [2], координат подспутниковых точек, соответствующего углового размера зоны обзора КАЗ, расчета правой и левой границ полосы обзора КАЗ для каждой подспутниковой точки и наложение их на картографическую основу с нанесенной на нее ПРВО; в случае,

если квадрат ПРВО попал между границами полосы обзора КАЗ, то считается, что он целиком покрыт ею;

3) модель, включающая в себя зависимости для определения межвиткового расстояния КАЗ, долгот левой и правой границ наклонных проекций каждого квадрата ПРВО на экватор Земли, долгот прохождения КАЗ восходящих узлов орбиты на заданном интервале времени $[T_n, T_k]$; в случае, если указанные долготы попадают между долготами левой и правой границ наклонной проекции, то квадрат ПРВО считается покрытым полосой обзора КАЗ.

Первая и вторая модели включают в себя трансцендентное уравнение Кеплера и требуют организации итеративных процедур, как для круговых, так и для эллиптических орбит КАЗ. Третья модель не требует применения подобных процедур для круговых орбит КАЗ.

МОДЕЛИ ОЦЕНИВАНИЯ ПРОГНОЗНОЙ ВЕРОЯТНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОРБИТАЛЬНЫХ ГРУППИРОВОК КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ЗЕМЛЕОБЗОРА ПО ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫМ ОБЛАСТЯМ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЕЙСТВИЙ ГРУППИРОВОК СИЛ ФЛОТА

Одним из подходов к оцениванию вероятности успешного применения КАЗ и их группировок по ПРВО, расположенным на поверхности Земли, является определение вероятности P_{zj} (где z – номер КАЗ, j – номер ПРВО) геометрическим способом, в котором она должна быть пропорциональна части ее площади – S_{zj} , хотя бы раз покрытой его полосой обзора за время $[T_n, T_k]$. Отношение этой площади ко всей площади ПРВО принято называть коэффициентом покрытия K_{zj} :

$$K_{zj} = S_{zj}(T_n, T_k) / S_j, 0 \leq K_{zj} \leq 1,$$

где S_j – площадь ПРВО.

Прогнозная вероятность успешного применения КАЗ за один r -й пролет над ПРВО определяется по формуле

$$P_{zj}^r = \begin{cases} K_{zj}^r \cdot P_{lz} \cdot P_2 & \text{– для КАЗ видового ДЗЗ;} \\ K_{zj}^r \cdot P_{lz} & \text{– для других типов КАЗ,} \end{cases} \quad (1)$$

где K_{zj}^r – коэффициент покрытия ПРВО на r -м пролете КАЗ.

Если за время $[T_n, T_k]$ КАЗ совершит R пролетов над ПРВО, то вероятность выполнения задачи применения будет определяться аналогично (1):

$$P_{zj}^R \geq \begin{cases} K_{zj}^R \cdot P_{lz} \cdot P_2 & \text{– для КАЗ видового ДЗЗ;} \\ K_{zj}^R \cdot P_{lz} & \text{– для других типов КАЗ,} \end{cases} \quad (2)$$

где K_{zj}^R – коэффициент покрытия за R пролетов КАЗ над ПРВО,

$$K_{zj}^R = \sum_{r=1}^R S_{zj}^r / S_j.$$

Появление знака «больше или равно» в (2) является следствием того, что часть или вся ПРВО в отведенное время может быть покрыта полосой обзора КАЗ несколько раз. Указанная неопределенность может быть разрешена путем дискретизации вероятностей при переходе к их оцениванию для каждого квадрата ПРВО. При этом полагается, что задача

применения КАЗ по квадрату ПРВО выполнена с некоторой вероятностью $P_{z/2}$, если он целиком покрыт полосой обзора:

$$P_{z3} = \begin{cases} \cdot P_{lz} \cdot P_2 & \text{– для КАЗ видового ДЗЗ;} \\ \cdot P_{lz} & \text{– для других типов КАЗ.} \end{cases} \quad (3)$$

Если число покрытий какого-либо m -го квадрата за R пролетов КАЗ над ПРВО за время $[T_n, T_k]$ составило n раз, то в предположении о независимости событий вероятность его успешного применения по этому квадрату определяется по формуле

$$P_z^m n = 1 - (1 - P_{z3m})^n, \quad (4)$$

где P_{z3m} – вероятность (3) для m -го квадрата ПРВО.

Тогда прогнозная вероятность успешного применения одиночного КАЗ, рассчитываемая по формуле (4) по всей ПРВО, будет лежать в одном из диапазонов:

1) если все квадраты ПРВО не по одному разу покрыты полосой обзора КАЗ –

$$\min P_z^m n \leq P_{zj} \leq \max P_z^m n;$$

2) если существуют «квадраты», покрытые полосой обзора КАЗ только один раз –

$$P_{z3} \leq P_{zj} \leq \max P_z^m n$$

3) если существуют «квадраты» ПРВО, не покрытые полосой обзора КАЗ –

$$0 \leq P_{zj} \leq \max P_z^m n.$$

В случае применения по одному и тому же m -му квадрату ПРВО совокупности Z КАЗ, выполняющих одну и ту же задачу, решение которой может быть достигнуто успешным применением хотя бы одного из них (задача I рода) или одновременным применением всех КА (задача II рода), вероятность их совместного успешного применения оценивается по формуле

$$P_{Zc}^m = \begin{cases} 1 - \prod_{z=1}^Z (1 - P_z^m n) & \text{– если выполняется задача I рода;} \\ \prod_{z=1}^Z P_z^m n & \text{– если выполняется задача II рода.} \end{cases}$$

Если все КАЗ обладают одинаковыми ТТХ, т.е. считается, что $P_{z3} = \text{const}$, то

$$P_{Zc}^m = \begin{cases} 1 - (1 - P_z^m n)^Z & \text{– если выполняется задача I рода;} \\ (P_z^m n)^Z & \text{– если выполняется задача II рода.} \end{cases}$$

На электронных картах оценивания прогнозности применения КАЗ по ПРВО информационного обеспечения действий ГСФ соответствующие вероятности могут быть представлены гистограммой, построенной на квадратах, аппроксимирующих ПРВО (рис. 2).

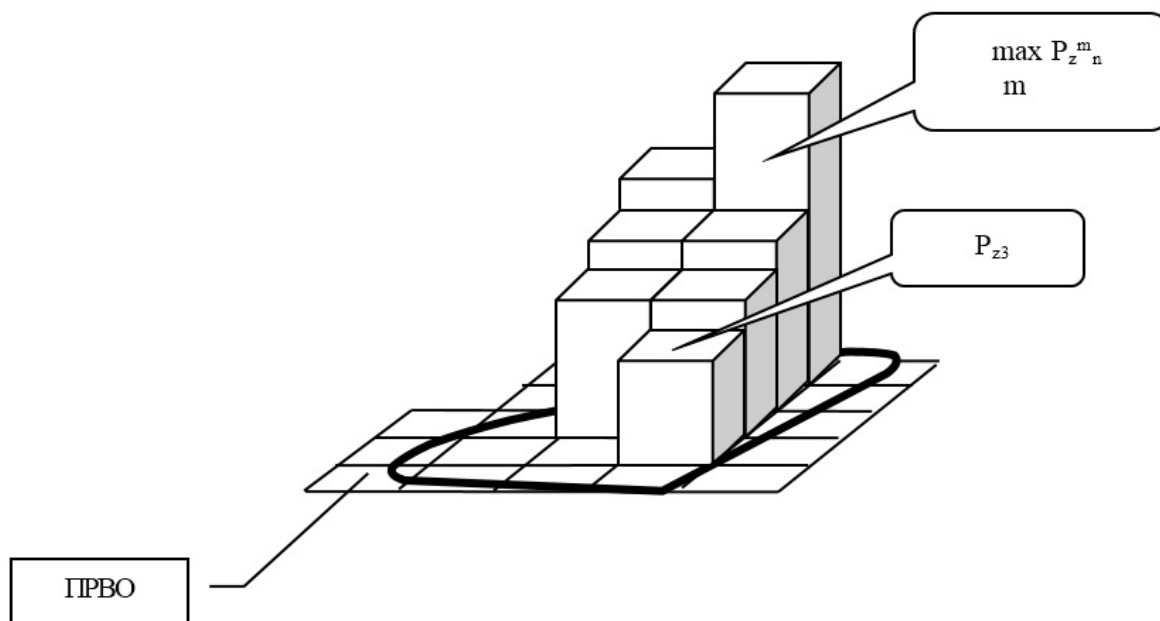


Рис. 2. Вид визуализации прогнозных вероятностей успешного применения КАЗ по ПРВО

ПРИМЕР ОЦЕНИВАНИЯ ПРОГНОЗНОЙ ВЕРОЯТНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОРБИТАЛЬНЫХ ГРУППИРОВОК КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ЗЕМЛЕОБОЗОРА ПО ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫМ ОБЛАСТЯМ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЕЙСТВИЙ ГРУППИРОВОК СИЛ ФЛОТА

Пусть, например, требуется оценить вероятности применения КА ДЗЗ и их ОГ по ПРВО по исходным данным:

1) параметры движения и вероятность выполнения разового цикла применения КА ДЗЗ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры движения и вероятности P_{1z}

Тип КА ДЗЗ	№ КА	$H_{крz}$	i_z	l_{z0}	t_{z0}	P_{1z}
		км	град	град	ч, м, с	
ОЭ	651	400	65	0	00,00,00	0,9
ОЭ	652	400	65	8	00,31,00	0,9
ОЭ	653	400	65	16	01,02,00	0,9
РЛ	751	1500	83	3	01,33,29	0,8
РЛ	752	1500	83	2	00,30,00	0,8

В табл. 1 введены следующие обозначения: ОЭ – видовой z-й КА ДЗЗ, РЛ – КА ДЗЗ другого типа, $H_{крz}$ – высота круговой орбиты z-го КА ДЗЗ.

Считаются заданными:

- времена $T_n = 00$ ч 00 мин 00 с, $T_k = 24$ ч 00 мин 00 с 05.02.2020;
- времена $T_{он} = 6$ ч 00 мин 00 с, $T_{ок} = 21$ ч 00 мин 00 с 05.02.2020;
- исходные данные по ОГ и ПРВО (табл. 2);

2) координаты вершин квадратов ПРВО по единой перенумерованной сетке (табл. 3);

3) вероятность достоверного метеопрогноза при принятии решения на применение КА на интервале цикла разового применения КА – $P_2 = 0,7$;

Таблица 2

Исходные данные по ОГ и РП

№ ОГ	КА ДЗЗ	№№ «квадратов» РРВО по единой перенумерованной сетке
1	651	1,2,12,13,14
	652	
	751	
2	652	1,2,12,13,14
	653	
	752	
3	651	1,2,12,13,14
	652	
	751	
	752	

Таблица 3

Координаты вершин «квадратов» РРВО в ГрСО

№ квадрата	Ψ_1	λ_1	Ψ_2	λ_2	Ψ_3	λ_3	Ψ_4	λ_4
	град.	град.	град.	град.	град.	град.	град.	град.
1	30	280	35	280	35	290	30	290
2	35	280	40	280	40	290	35	290
12	30	290	35	290	35	300	30	300
13	35	290	40	290	40	300	35	300
14	40	290	45	290	45	300	40	300

4) требуемая вероятность применения ОГ по РРВО – $P_{тр} = 0,96$;

5) угловые ограничения на работу бортовой специальной аппаратуры КА ДЗЗ отсутствуют.

При моделировании считалось, что если восходящий узел орбиты КА ДЗЗ освещен Солнцем, то и все квадраты РРВО освещены им. Результаты оценивания через каждый час заданных суток представлены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты оценивания

ОГ № 1							ОГ № 2							ОГ № 3							
СУТОЧНОЕ ВРЕМЯ	№кв.	№кв.	№кв.	№кв.	№кв.	№кв.	СУТОЧНОЕ ВРЕМЯ	№кв.	№кв.	№кв.	№кв.	№кв.	№кв.	СУТОЧНОЕ ВРЕМЯ	№кв.	№кв.	№кв.	№кв.	№кв.	№кв.	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0,8	1	0	0	0	0	0	0,8	
2	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0,8	2	0	0	0	0	0	0,8	
3	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0,96	3	0	0	0	0	0	0,96	
4	0	0	0	0	0,8	0	4	0	0	0	0	0	0,96	4	0	0	0	0	0,8	0,96	
5	0	0	0	0	0,8	0	5	0	0	0	0	0	0,992	5	0	0	0	0	0,8	0,992	
6	0	0	0	0	0,96	0	6	0	0	0	0	0	0,992	6	0	0	0	0	0,96	0,992	
7	0,63	0,8631	0,63	0,9852	0,63		7	0	0,63	0,63	0	0	0,992	7	0,63	0,8631	0,63	0,9852	0,99704		
8	0,926	0,989869	0,926	0,99704	0,926		8	0	0,8631	0,63	0	0	0,992	8	0,926	0,989869	0,926	0,99704	0,999408		
9	0,926	0,996252	0,926	0,99704	0,97262		9	0	0,8631	0,8631	0	0	0,9984	9	0,926	0,996252	0,989869	0,99704	0,999866		
10	0,926	0,996252	0,926	0,999408	0,97262		10	0	0,8631	0,8631	0	0	0,9984	10	0,926	0,996252	0,989869	0,999408	0,999866		
11	0,926	0,996252	0,926	0,999408	0,97262		11	0	0,8631	0,8631	0	0	0,99968	11	0,926	0,996252	0,989869	0,999408	0,999866		
12	0,926	0,998613	0,926	0,999882	0,97262		12	0	0,949347	0,949347	0	0	0,99968	12	0,926	0,998613	0,996252	0,999882	0,999866		
13	0,926	0,999487	0,926	0,999882	0,97262		13	0	0,981258	0,949347	0	0	0,99968	13	0,926	0,999487	0,996252	0,999882	0,999866		
14	0,9852	0,999897	0,9852	0,999976	0,994524		14	0	0,981258	0,981258	0	0	0,999936	14	0,9852	0,999897	0,999723	0,999976		1	
15	0,997974	0,999986	0,994524	0,999991	0,99925		15	0,63	0,980666	0,981258	0	0	0,999936	15	0,997974	0,999986	0,999897	0,999991		1	
16	0,99925	0,999998	0,997974	0,999998	0,99925		16	0,63	0,997434	0,981258	0	0	0,999937	16	0,99925	0,999998	0,999897	0,999998		1	
17	0,99925	0,999998	0,997974		1	0,99925	17	0,63	0,997434	0,980666	0	0	0,999937	17	0,99925	0,999998	0,999897		1	1	
18	0,99925	0,999999	0,997974		1	0,99925	18	0,63	0,999051	0,997434	0	0	0,999937	18	0,99925	0,999999	0,999897		1	1	
19	0,99925	0,999999	0,997974		1	0,99925	19	0,63	0,999051	0,997434	0	0	0,999937	19	0,99925	0,999999	0,999897		1	1	
20	0,99925	0,999999	0,997974		1	0,99925	20	0,63	0,999051	0,997434	0	0	0,999937	20	0,99925	0,999999	0,999897		1	1	
21	0,99925		1	0,997974		1	0,99925	21	0,63	0,999648	0,997434	0	0	0,999937	21	0,99925		1	0,999897		1
22	0,99925		1	0,997974		1	0,99925	22	0,63	0,999648	0,997434	0	0	0,999939	22	0,99925		1	0,999897		1
23	0,99925		1	0,997974		1	0,99925	23	0,63	0,999648	0,997434	0	0	0,999939	23	0,99925		1	0,999897		1

На рис. 3 приведены соответствующие графики. Для графиков на рис. 3 использованы обозначения, приведенные в табл. 5.

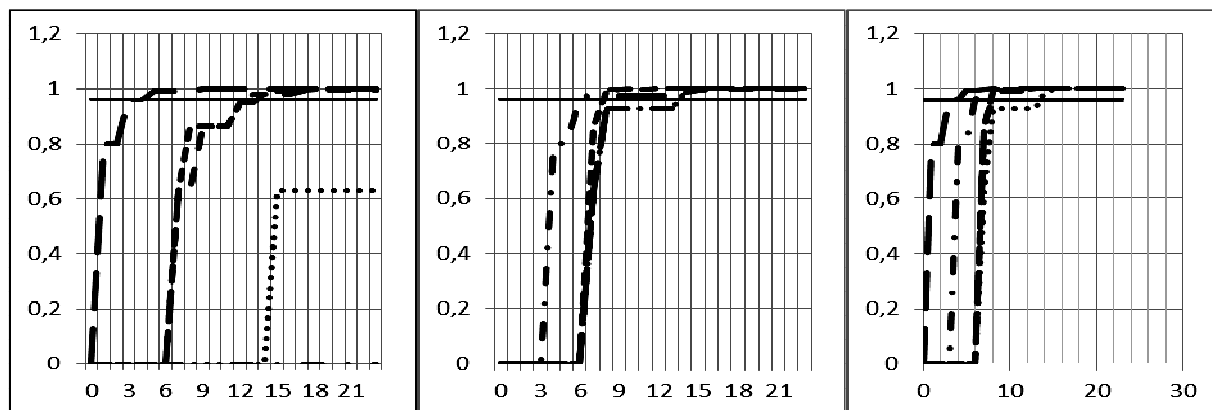


Рис. 3. Графики зависимостей прогнозной вероятности успешного применения ОГ КА ДЗЗ по ПРВО:
а – ОГ №1; б – ОГ № 2; в – ОГ № 3

Таблица 5

Обозначения графиков

.....	квадрат № 1
.....	квадрат № 2
— — —	квадрат № 12
— . —	квадрат № 13
— — —	квадрат № 14
————	для $P_{тр}$

Из рис. 3 видно, что зависимости прогнозных вероятностей успешного применения ОГ КА ДЗЗ по квадратам ПРВО носят возрастающий с участками постоянных значений характер. Указанные участки соответствуют интервалам времен, когда квадраты ПРВО не покрыты полосами обзора КА ДЗЗ. При применении ОГ № 1 вероятность ее успешного применения по квадрату № 13 равна нулю, так как ни один КА ДЗЗ этой ОГ не пролетает над этим квадратом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные в статье модели в представленном виде могут служить основой алгоритмов, методов и методик оценивания прогнозной вероятности и других вероятностных характеристик применения ОГ КАЗ по ПРВО информационного обеспечения действий ГСФ. В то же время к основным направлениям последующих научных исследований должны быть отнесены:

- 1) исследование величин относительных эксцентриситетов орбит КАЗ, при которых допустимо использование третьей из рассмотренных моделей;
- 2) разработка комплексного алгоритма применения моделей оценивания покрытия квадратов ПРВО полосами обзора КАЗ;
- 3) создание моделей учета освещенности ПРВО Солнцем;
- 4) разработка моделей оценивания эффективности применения КАЗ и соответствующих ОГ критерия пригодности применения.

Список используемых источников

1. *Минаков Е.П., Шафигуллин И.Ш., Зубачев А.М.* Методы исследования эффективности применения организационно-технических систем космического назначения: учебник. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. – 244 с.
2. Справочное руководство по небесной механике и астродинамике / В.К. Абалакин, Е.П. Аксенов, Е.А. Гребенников и др. – М.: Наука, 1972. – 584 с.
3. *Аверкиев Н.Ф., Богачев С.А., Васьков С.А.* Основы теории полета летательных аппаратов. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2013. – 242 с.
4. Инженерный справочник по космической технике. – МО СССР, 1969. – 696 с.
5. *Баринов К.Н., Бурдаев М.Н., Мамон П.А.* Динамика и принципы построения орбитальных систем космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 1975. – 232 с.

К.В. Алексеев,
кандидат техн. наук, доцент;
Е.Л. Лебедев,
доктор техн. наук, профессор;
Н.С. Самойлов,
доктор техн. наук, профессор

ПРИМЕНЕНИЕ АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ В КОНСТРУКЦИОННОМ МАТЕРИАЛЕ ЭЛЕМЕНТОВ ВООРУЖЕНИЯ, ВОЕННОЙ И СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕХНИКИ В УСЛОВИЯХ ЗНАКОПЕРЕМЕННОЙ НАГРУЗКИ

Приведены результаты экспериментальных исследований применения акустико-эмиссионных средств для регистрации трещинообразования в образцах, выполненных из сплава 1160 (Д16АТ). Образцы подвергались испытаниям на одноосное растяжение с приложением знакопеременной нагрузки, при этом имитировался технологический или эксплуатационный дефект – концентратор напряжения в виде трещины, развитие которой осуществлялось хрупко. Моделирование концентратора напряжения осуществлялось с применением технологии жидкометаллического охрупчивания алюминиевых сплавов. Показана возможность регистрации начала образования и развития трещины, развивающейся вязко, методом среза от концентратора напряжения. Обоснованы параметры акустико-эмиссионных сигналов, информативность которых является достаточной для решения указанной задачи. К таковым параметрам отнесены количество N , активность \dot{N}_z , энергия E и энергетическая активность \dot{E}_z сигналов. Показаны отличия в закономерностях изменения данных параметров в процессе развития трещины в условиях одновременного воздействия статического напряжения и знакопеременной нагрузки.

Ключевые слова: трещина, знакопеременная нагрузка, акустическая эмиссия.

ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] обоснована возможность регистрации трещинообразования в конструкционном материале с использованием акустико-эмиссионных средств в условиях одноосного растяжения. Обоснованы параметры акустико-эмиссионных (АЭ) сигналов, информативность которых является достаточной для решения указанной задачи применительно к образцам вооружения, выполненным из сплава 1160 (Д16АТ). К таковым параметрам отнесены количество – N , активность – \dot{N}_z , энергия – E и энергетическая активность – \dot{E}_z сигналов. Однако для практического применения предлагаемого метода на реальном объекте ВВСТ необходимо провести ряд дополнительных экспериментальных исследований. Учитывая, что типовые эксплуатационные разрушения как правило происходят вследствие возникновения усталостных трещин под воздействием знакопеременных нагрузок [2, 3], требуется оценить возможность предлагаемой акустико-эмиссионной системы регистрировать динамику процесса накопления микродефектов в структуре конструкционного материала. Кроме того, важным является вопрос возможности выявления «полезного» акустического сигнала (сигнала от контролируемого дефекта) на фоне эксплуатационных шумов (шумов, возникающих при функционировании диагностируемого объекта) [4].

Таким образом, целью проведенного экспериментального исследования является определение закономерностей изменения информативных параметров АЭ сигналов начала образования и развития трещины, возникающих при знакопеременной нагрузке и возможность выявления данных сигналов в условиях эксплуатационных шумов.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенные экспериментальные исследования в целом соответствовали исследованиям, описанным в работе [1], и заключались в последовательном решении следующих задач:

– подготовке образцов для экспериментальных исследований (в соответствии с ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение» толщина образцов составляла 1; 1,5 и 2 мм [1]);

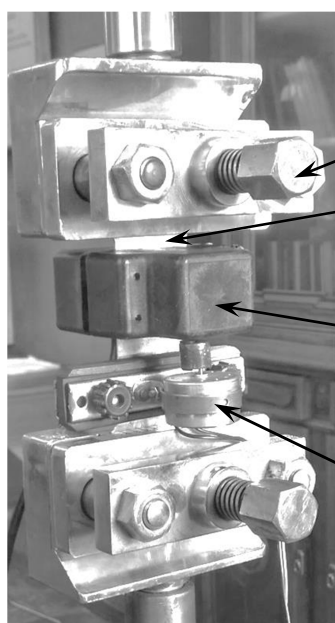
– создании микротрещины для имитации эксплуатационного или технологического дефекта – концентратора напряжений, длиной 1-2 мм [1, 6];

– проведении испытаний образцов с концентраторами напряжений с одновременной регистрацией значений параметров АЭ сигналов, инициированных физическими процессами разрушения (образования и развития трещины) данных образцов на разрывной машине ИР 5113-100-11.

Отличием испытаний образцов от испытаний, выполненных в работе [1], являлось то, что образцы не испытывались в условиях одноосного растяжения, а в них создавалось статическое одноосное напряжение ($\sigma^{\text{стат}} \approx 0,25 \cdot \sigma_{0,2} \approx 100$ МПа) разрывной машиной ИР 5113-100-11 и одновременно знакопеременное напряжение ($\sigma^{\text{перем}} \approx \pm 5-10$ МПа) с частотой 5–40 Гц в направлении как вдоль, так и поперек статической нагрузки.

Для регистрации АЭ сигналов, возникающих при начале образования и развитии трещины, на образец устанавливался пьезоэлектрический датчик ПР-15И, сигналы от которого регистрировались и обрабатывались акустико-эмиссионной системой «Малахит АС-12А».

Закрепление исследуемого образца в разрывной машине и крепление на образце датчика ПР-15И, а также виброустройства для создания знакопеременной нагрузки показаны на рис. 1.



Зажимы разрывной машины
ИР 5113-100-11

Исследуемый образец

Пьезоэлектрический
датчик ПР-15И
акустико-эмиссионной
системы «Малахит АС-
12А»

Виброустройство, создающее
знакопеременную нагрузку



Рис. 1. Закрепление испытуемого образца с пьезоэлектрическим датчиком и виброустройством для создания знакопеременной нагрузки в зажимах разрывной машины ИР 5113-100-11

Согласно полученным результатам образец с концентратором напряжения в виде трещины после создания статической растягивающей нагрузки не подвергался разрушению. Однако после приложения знакопеременной нагрузки наблюдалось разрушение образца от концентратора напряжений. Сравнение диаграмм «напряжение – деформация», полученных

при данных испытаниях и испытаниях, проведенных в работе [1], показано на рис. 2. Время до начала разрушения, определяемое как время от начала приложения знакопеременной нагрузки до начала разрушения образца, зависело от частоты и амплитуды данной нагрузки и составляло от 2 до 45 с. Зависимость указанного времени от амплитуды и частоты знакопеременной нагрузки показана на рис. 3. Количество циклов до разрушения определено как произведение частоты приложения знакопеременной нагрузки на время до начала разрушения образцов. Показано (рис. 4), что количество циклов до разрушения не зависит от частоты колебаний (несовпадение кривых на рис. 4 объясняется погрешностью измерений) и определяется только амплитудой знакопеременных колебаний, что в целом соответствует положениям, указанным в работе [5].

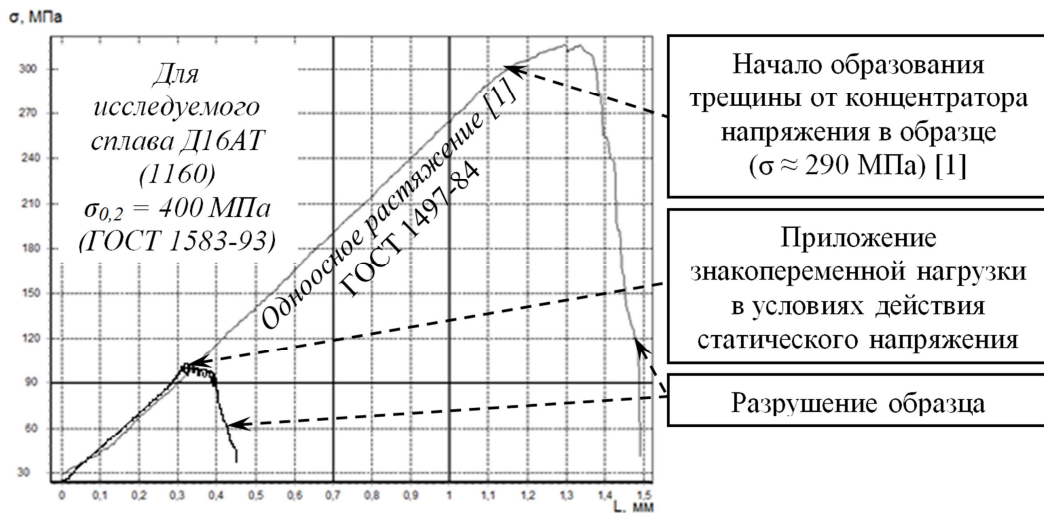


Рис. 2. Сравнение диаграмм «напряжение – деформация», полученных при данных испытаниях и испытаниях, проведенных в работе [1]

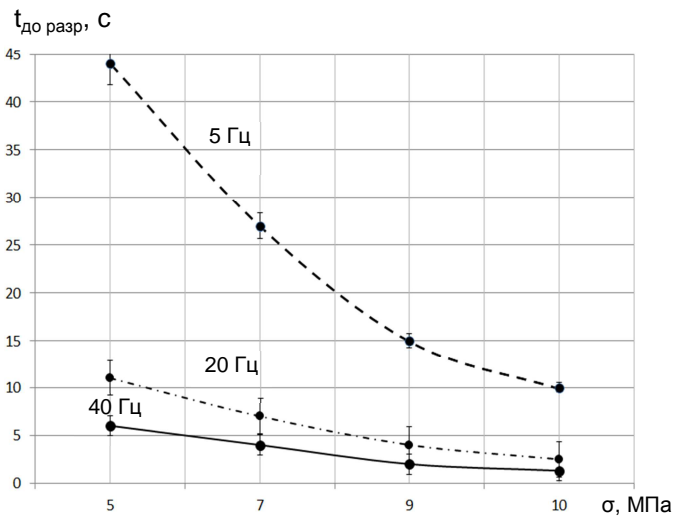


Рис. 3. Зависимость времени до начала разрушения от амплитуды и частоты знакопеременной нагрузки

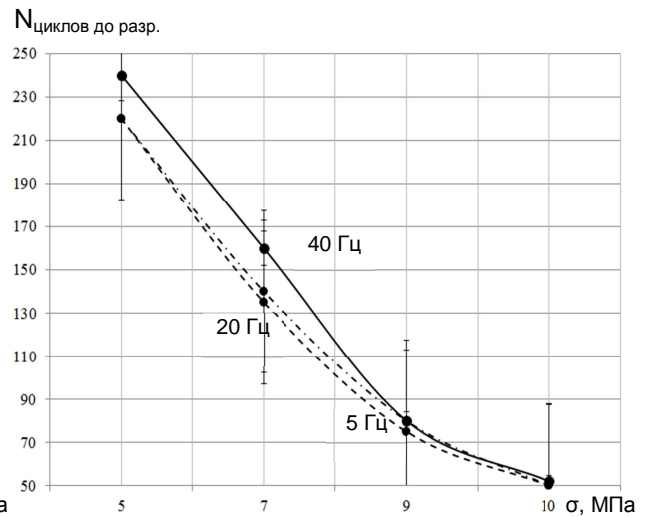
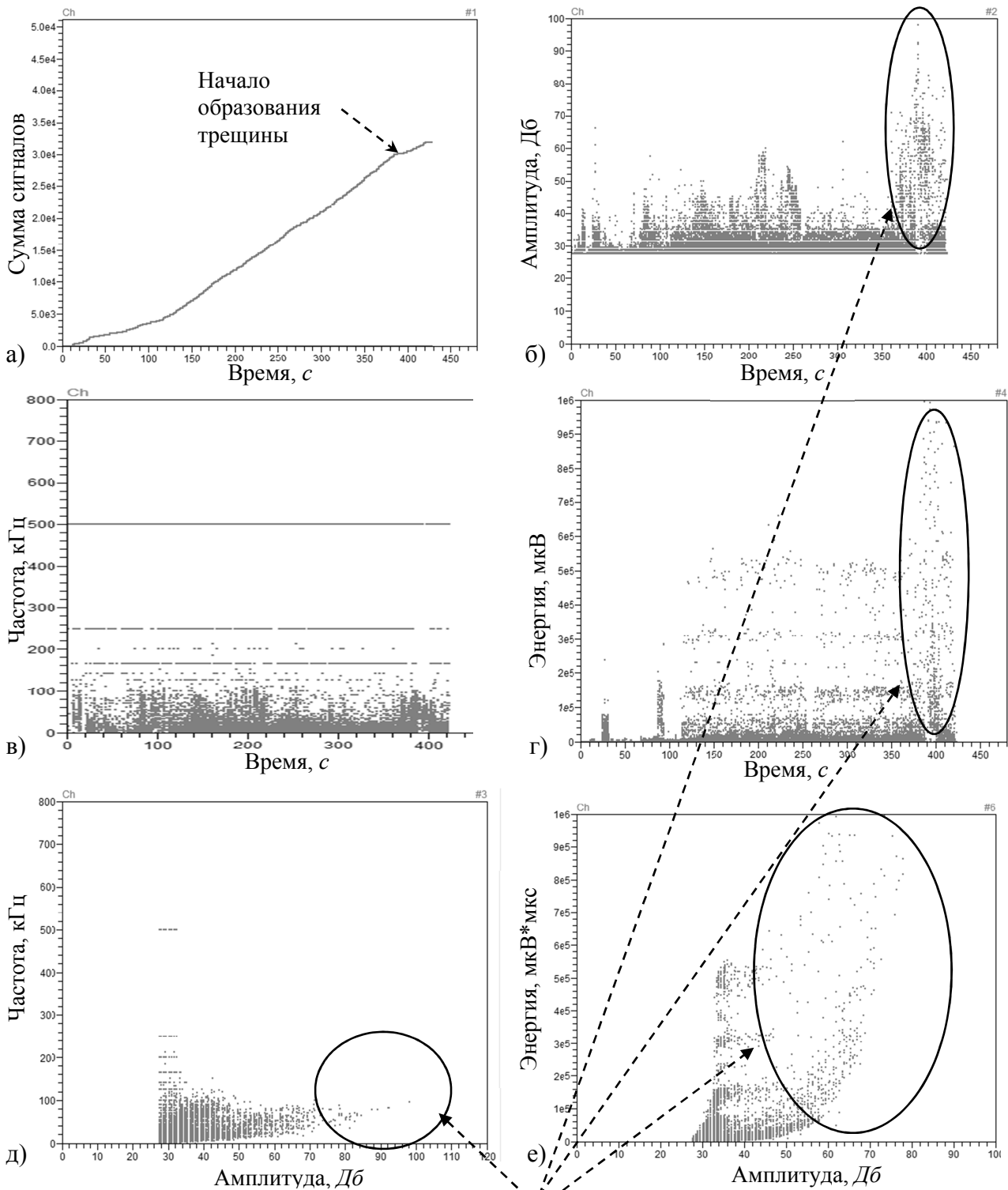


Рис. 4. Зависимость количества циклов до разрушения от амплитуды и частоты знакопеременной нагрузки

Данные результаты свидетельствуют, что при наличии концентраторов напряжений в виде трещин, сформированных по методике [6], в элементах, выполненных из сплава Д16АТ (1160), при наличии одновременного воздействия статической и знакопеременной нагрузки разрушение будет осуществляться даже при уровне статических напряжений $0,25 \cdot \sigma_{0,2} \approx 100$ МПа.

При отсутствии знакопеременной нагрузки подобные разрушения возникают при напряжении 290 МПа [1].

Динамика изменения АЭ параметров, а также амплитудно-частотная характеристика (спектр распределение) (рис. 5,д) и зависимость энергии от амплитуды АЭ сигналов (рис. 5,е) при образовании и развитии регистрируемой трещины указаны на рис. 5.



АЭ сигналы, характеризующие развитие трещины

Рис. 5. Динамика изменения параметров АЭ сигналов за время разрушения исследуемых образцов при испытании в условиях приложения знакопеременной нагрузки

Согласно представленным на рисунке данным в момент образования и развития трещины от концентратора напряжений в образце регистрируется изменение параметров АЭ сигналов. Данное изменение заключается в первую очередь в увеличении энергии E (рис. 5,г) и амплитуды сигналов A (рис. 5,б), при этом частота сигналов F (рис. 5,в) практически не изменяется, что в целом соответствует аналогичным изменениям, полученным при испытаниях, описанных в [1], но наблюдаются и отличия. В частности, согласно [1] было зафиксировано увеличение скорости роста суммы сигналов N в момент образования трещины, однако в условиях знакопеременной нагрузки отмечено не увеличение, а замедление скорости роста суммы сигналов N в момент образования трещины (рис. 5,а), угол наклона соответствующей кривой к оси времени уменьшается.

Отмеченная динамика изменения параметра N объясняется как спецификой прилагаемой нагрузки, так и спецификой развития «усталостных» трещин. Приложение знакопеременной нагрузки сопровождается накоплением сигналов от источника знакопеременных нагрузок (эксплуатационным шумом) и сигналами от элементарных дефектов, возникающих в устье «усталостной» трещины. Для момента развития «усталостной» трещины характерно объединение возникших элементарных дефектов (рис. 6 [7]), при этом количество сигналов от их возникновения снижается. Развитие «усталостных» трещин сопровождается разрушением связей кристаллической решетки, что является причиной высокоамплитудных и, как следствие, высокоэнергетических сигналов, однако данных событий (разрывов связей) меньше, учитывая механизм «объединения» [4], чем при развитии трещины, возникающей при одноосном растяжении [1]. Этим объясняется снижение динамики параметра N , которая после образования трещины определяется в основном эксплуатационным шумом.

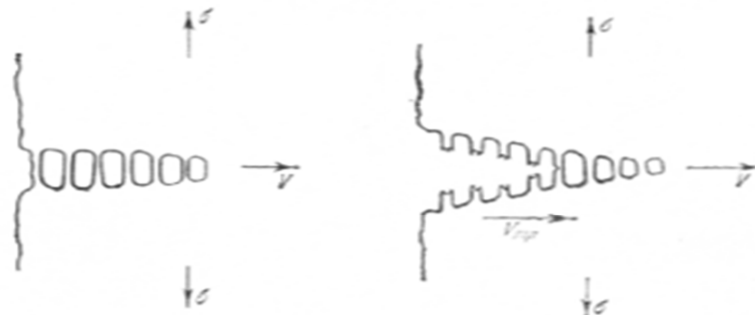


Рис. 6. Схема развития «усталостной» трещины [7]

Поскольку были выявлены закономерности, особенность которых заключается не в повышении скорости роста количества сигналов N на фоне повышения амплитуды (энергии) сигналов, а в снижении параметра N , то важным является оценивание динамики таких параметров, как активность – \dot{N}_Σ и энергетическая активность – \dot{E}_Σ АЭ сигналов. На рис. 7 показано изменение данных параметров при различных частотах знакопеременной нагрузки и при образовании контролируемой трещины от концентратора напряжений. Полученные результаты свидетельствуют, что при повышении частоты знакопеременной нагрузки значение активности АЭ сигналов (параметр \dot{N}_Σ) увеличивается, а при образовании трещины – снижается. При этом снижение происходит до значения, соизмеримого со значением данного параметра при низкой частоте знакопеременной нагрузки (~5 Гц), что может затруднить процесс идентификации начала образования контролируемой трещины. Кроме того, наблюдается изменение энергетической активности (параметр \dot{E}_Σ). Показано, что значение данного параметра практически не зависит от частоты знакопеременной нагрузки, но увеличивается более чем в 6 раз при образовании контролируемой трещины. Таким образом, можно утверждать, что для идентификации начала образования трещин в условиях действия знакопеременных нагрузок

необходимо учитывать факт снижения активности сигналов \dot{N}_Σ с одновременным увеличением энергетической активности \dot{E}_Σ .

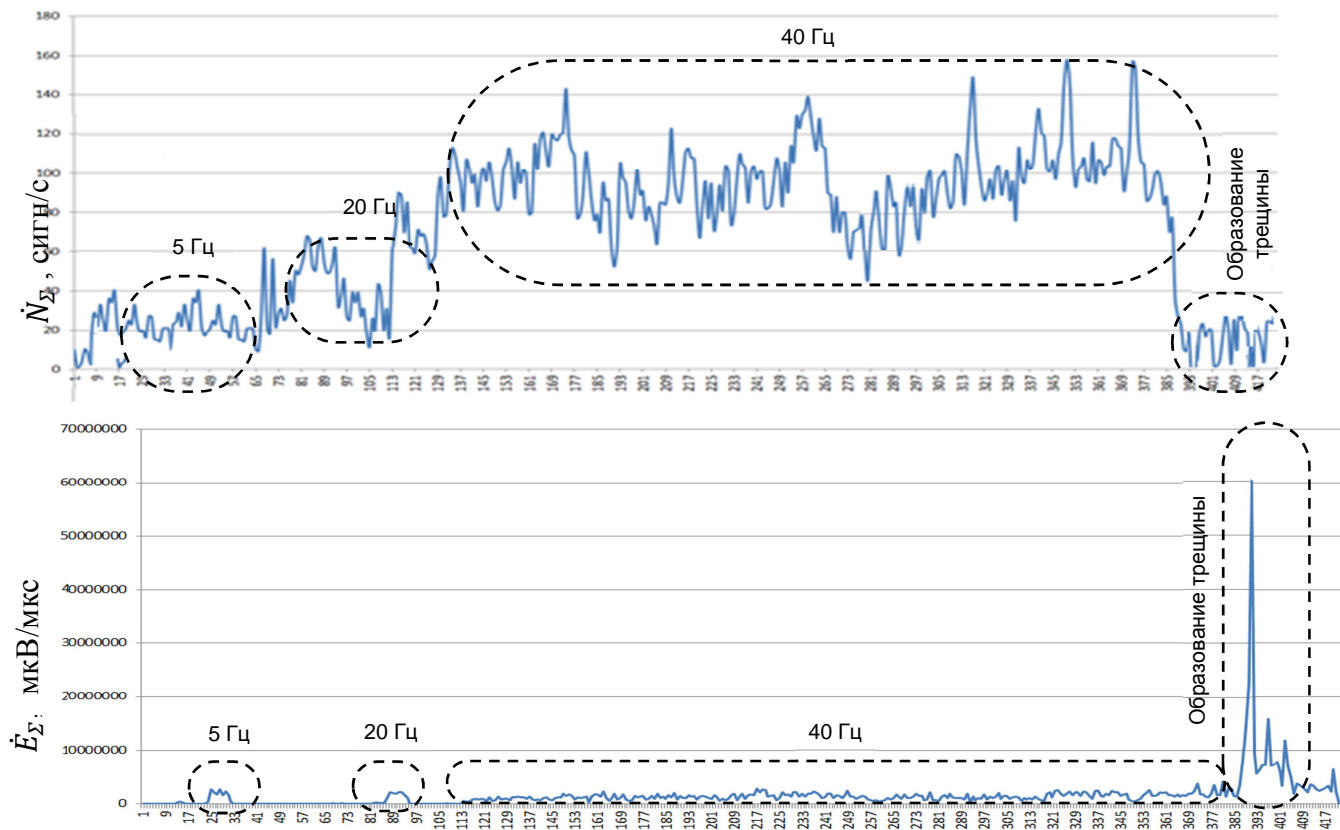


Рис. 7. Изменение параметров АЭ сигналов при различных частотах знакопеременной нагрузки и при образовании трещины от концентратора напряжения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о необходимости контроля работоспособности элементов ВВСТ в условиях сочетания концентраторов напряжения и знакопеременной нагрузки. Показано, что при сочетании данных факторов значения эксплуатационных нагрузок, при которых возможно разрушение, снижаются в несколько раз. Особенно опасным является «наложение» различных видов нагрузок при наличии концентратора напряжений, например наложение стационарной и знакопеременной нагрузок. В этом случае разрушение будет осуществляться даже при уровне статических напряжений ≈ 100 МПа. При отсутствии знакопеременной нагрузки (но при наличии концентратора напряжений) подобные разрушения возникают при напряжении 290 МПа ($\sigma_{0,2} = 400$ МПа).

Представлены зависимости времени и количества циклов до разрушения от амплитуды и частоты знакопеременной нагрузки. Время до разрушения составляло от 2 до 45 с, количество циклов до разрушения – от 50 до 250.

Показано, что по параметрам АЭ сигналов, а именно, по сумме N , активности \dot{N}_Σ , энергии E и энергетической активности \dot{E}_Σ сигналов, возможно регистрировать начало разрушения образцов. Особенностью данного разрушения является то, что при повышении частоты знакопеременной нагрузки (частоты эксплуатационного шума) значение активности АЭ сигналов увеличивается, а при образовании трещины – снижается. Это объясняется механизмом развития «усталостных» трещин. Такое изменение данного параметра АЭ сигналов

в сочетании с увеличением энергетической активности, характерное только для данного разрушения, и позволяет идентифицировать начало образования «усталостных» трещин.

Список используемых источников

1. Применение акустико-эмиссионных средств для регистрации начала образования и развития трещин в конструкционном материале корпусов летательных аппаратов / К.В. Алексеев, Е.Л. Лебедев, И.Е. Мухин и др. // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2017. – Вып. 658. – С 119–129.

2. С.В. Бутушин, А.В. Семин, Ю.М. Фейгенбаум Оценка вероятности развития усталостного повреждения в элементах конструкции планера воздушного судна, имеющего производственные дефекты // Научный вестник МГТУ ГА. – 2011. – №163. – С. 103–109.

3. Методические основы синтеза систем диагностики технического состояния космических и летательных аппаратов: монография / И.Е. Мухин, А.И. Мухин, С.Н. Михайлов и др. – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2018. – 211 с.

4. Иванов В.И., Бигус Г.А., Власов И.Э. Акустическая эмиссия: учеб. пособие / под общ. ред. В.В. Клюева. – 2-е изд. – М.: Спектр, 2015. – 192 с.

5. Н.С. Самойлов, А.Н. Самойлов Ускоренные методы определения выносливости и термостойкости: монография. – СПб.: НПО «Профессионал», 2012. – 324 с.

6. Патент № 2287396. Способ образования трещин в образцах для испытания алюминиевых сплавов / Е.Л. Лебедев. – Заявл. 17.10.2011; зарегистрировано в Гос. реестре изобретений РФ 20.07.2012.

7. Ригель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. – М.: Наука, 1974. – 560 с.

В.Н. Арсеньев,
доктор техн. наук, профессор;
С.Ю. Балуев,
кандидат техн. наук, доцент;
Е.Н. Белихин

МОДЕЛЬ БОРТОВОГО ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО СРЕДСТВА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАВИСИМОСТИ ЕГО ПОГРЕШНОСТИ ОТ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ

Описаны исследования зависимости погрешности бортовых оптико-электронных средств (БОЭС) от значений их параметров. Погрешность БОЭС характеризуется ошибкой оценки координат центра изображения космического объекта (КО). Представлена математическая модель, позволяющая определить погрешность БОЭС для конкретного набора значений параметров. Приведены результаты исследований с использованием данной модели, показывающие характерные особенности изменения погрешности при вариации значения параметров БОЭС.

Ключевые слова: оптико-электронные средства, матричные приемники оптического излучения, погрешность измерений.

ВВЕДЕНИЕ

Высокоточное определение параметров движения КО является одной из главных задач системы мониторинга космического пространства. Решить данную задачу можно методом космической триангуляции. В работах [1, 2] подробно рассмотрены вопросы его применения, а также проведен анализ и обоснованы требования к погрешности угловых измерений БОЭС.

Погрешность угловых измерений БОЭС и, соответственно, погрешность определения параметров движения наблюдаемых КО зависят от значений его параметров, которые могут изменяться. Существующие математические модели [3] позволяют связать погрешность БОЭС лишь с небольшим числом параметров (размер чувствительного элемента, фокусное расстояние и диаметр входного зрачка объектива). Кроме того, в работе [3] рассматривается влияние параметров БОЭС по отдельности, а не всех одновременно. Для повышения достоверности оценивания погрешности БОЭС необходимо использовать модель, учитывающую также влияние энергетических характеристик матричных приемников оптического излучения (МПОИ).

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ БОРТОВОГО ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО СРЕДСТВА

Полагается, что известны параметры БОЭС: фокусное расстояние объектива – f ; диаметр входного зрачка – D ; линейный размер пиксела МПОИ – d ; размер чувствительной области пиксела МПОИ – d_0 ; разрядность аналого-цифрового преобразователя (АЦП) – $n_{\text{АЦП}}$; квантовая эффективность пиксела в оптическом спектре длин волн λ – $\eta(\lambda)$; коэффициент преобразования МПОИ – $k_{\text{МПОИ}}$. Время экспозиции $\hat{t}_{\text{экс}}$, максимальное значение сигнала на пикселе МПОИ \hat{A}_{max} и значение суммарного шума пиксела МПОИ \hat{A}_{Σ} являются случайными величинами, распределенными по нормальному закону с известными математическими ожиданиями и дисперсиями.

Положение изображения КО рассматривается в пределах кластера размером 7×7 пикселей МПОИ. Координаты центра изображения КО $\frac{x_0}{f}, \frac{y_0}{f}$ заданы.

Предполагается, что наблюдается КО, излучающий в диапазоне длин волн со средним значением λ_{cp} .

Необходимо построить математическую модель, которая свяжет погрешность БОЭС со значениями параметров: $\hat{t}_{\text{экс}}, \hat{A}_{\Sigma}, \hat{A}_{\text{max}}$.

РАСЧЕТ ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЦЕНТРА ИЗОБРАЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА

Определение параметров движения КО является многоэтапным процессом. На первом этапе с помощью оптической системы (ОС) получается изображение наблюдаемых КО на МПОИ, с которым связана приборная система координат (ПСК). На втором этапе производится обработка и фильтрация информации, полученной от всех наблюдаемых КО, а на третьем и последующих этапах решаются задачи определения координат изображения КО в ПСК, непосредственного расчета параметров движения КО и др. На всех этапах задействуются различные элементы БОЭС.

Для построения математической модели погрешности угловых измерений необходимо рассмотреть основные особенности формирования отметки КО в БОЭС.

Оптическая система проецирует изображение космического объекта на плоскость МПОИ в виде пятна рассеяния. Распределение освещенности в плоскости МПОИ можно охарактеризовать функцией рассеяния точки (ФРТ) [4-6]:

$$\hat{E}(x, y) = \frac{\Phi_{\text{КО}} \hat{t}_{\text{экс}}}{2\pi r_0^2} e^{-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2r_0^2}} \quad (1)$$

где $\Phi_{\text{КО}}$ – поток оптического излучения от КО;

x, y – координаты точки в приборной системе координат;

r_0 – эффективный радиус рассеяния точки, $r_0 = \frac{1,22\lambda_{\text{cp}}f}{D}$.

Так как в настоящей работе рассматривается оптический спектр длин волн, то распределению освещенности соответствует распределение фотонов рассматриваемого спектрального диапазона:

$$\hat{n}_{\text{КО}}^{\Phi}(x, y) = \frac{\Phi_{\text{КО}} \hat{t}_{\text{экс}}}{2\pi r_0^2 \chi} e^{-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2r_0^2}}, \quad (2)$$

где χ – средняя энергия фотона в оптическом спектре длин волн.

Поток фотонов, сконцентрированный ОС в плоскости МПОИ, распределяется между элементарными фотоприемниками – пикселями. На выходе АЦП каждого пикселя формируется дискретный сигнал, который пропорционален напряжению с выходной емкости пикселя. Напряжение соответствует общему числу сгенерированных за время экспозиции носителей заряда и представляет собой сумму полезного сигнала и шумовой составляющей:

$$\hat{A}^{i,j} = k_{\text{МПОИ}} \eta(\lambda) \hat{n}_{\text{КО}}^{i,j} + \hat{A}_{\Sigma}, \quad (3)$$

где i, j – номера строки и столбца рассматриваемого пикселя МПОИ соответственно;

$\hat{n}_{\text{КО}}^{i,j}$ – количество фотонов от КО на пикселе с координатами i, j .

Так как ПСК привязана к центрам пикселей МПОИ, т.е. единичный отрезок осей ПСК равен d , то с учетом выражений (2) и (3) получим формулу для вычисления значения сигнала на каждом пикселе кластера МПОИ, в пределах которого проецируется изображение КО:

$$\hat{A}^{i,j} = \frac{k_{\text{МПОИ}} \eta(\lambda) \Phi_{\text{КО}} \hat{t}_{\text{экс}}}{2\pi r_0^2 \chi} \int_{i-\frac{d_0}{2}}^{i+\frac{d_0}{2}} \int_{j-\frac{d_0}{2}}^{j+\frac{d_0}{2}} e^{-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2r_0^2}} dx dy + \hat{A}_{\Sigma}. \quad (4)$$

На этапе обработки сигнала в БОЭС производится его дискретизация. Для пикселей любого МПОИ существует максимальное значение сигнала, которое может накопиться на пикселе. Так как число разрядов АЦП пикселей МПОИ определено, то значение шага квантования АЦП МПОИ определяется выражением

$$\hat{h}_{\text{АЦП}} = \frac{\hat{A}_{\text{max}}}{2^{n_{\text{АЦП}}}}. \quad (5)$$

При любых условиях наблюдения КО сигнал на пикселе не может превысить \hat{A}_{max} , поэтому дискретный сигнал на выходе АЦП пикселя имеет вид

$$\hat{A}_{\text{д}}^{i,j} = \begin{cases} 2^{n_{\text{АЦП}}}, & \text{если } \hat{A}^{i,j} \geq \hat{A}_{\text{max}}; \\ E[\hat{A}^{i,j} / \hat{h}_{\text{АЦП}}], & \text{если } \hat{A}^{i,j} < \hat{A}_{\text{max}}. \end{cases} \quad (6)$$

В формуле (6) символом $E[.]$ обозначена операция выделения целой части из дробного числа.

В вычислительном блоке расчет энергетического центра пятна рассеяния производится посредством обработки дискретных сигналов, поступающих с каждого пикселя МПОИ. Для этого дискретные сигналы с пикселей МПОИ обрабатываются центроидным алгоритмом [7, 8], на основе которого получаются оценки координат энергетического центра в кластере пикселей МПОИ:

$$\hat{x}_0 = \frac{\sum_{i=1}^7 i \sum_{j=1}^7 \hat{A}_{\text{д}}^{i,j}}{\sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^7 \hat{A}_{\text{д}}^{i,j}}; \quad (7)$$

$$\hat{y}_0 = \frac{\sum_{j=1}^7 j \sum_{i=1}^7 \hat{A}_{\text{д}}^{i,j}}{\sum_{j=1}^7 \sum_{i=1}^7 \hat{A}_{\text{д}}^{i,j}}. \quad (8)$$

По оценкам координат центра изображения космического объекта определяются значения угловых ошибок БОЭС:

$$\Delta \hat{\rho}_x = \frac{x_0 - \hat{x}_0}{f}; \quad (9)$$

$$\Delta \hat{\rho}_y = \frac{y_0 - \hat{y}_0}{f}. \quad (10)$$

В совокупности выражения (4)–(10) представляют собой математическую модель зависимости погрешности БОЭС от его параметров, которая позволяет исследовать влияние параметров БОЭС на его погрешность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана математическая модель БОЭС для исследования зависимости его погрешности от значений параметров. Особенностью модели является учет широкого спектра варьируемых параметров, а также возможность учета изменения потока оптического излучения от КО.

Изображение КО на плоскости МПОИ аппроксимируется ФРТ, что допустимо в рамках рассматриваемой задачи и значительно упрощает вычислительный процесс.

Для обработки дискретных сигналов с пикселей МПОИ выбран центроидный алгоритм. Он позволяет достаточно просто рассчитать оценку координат энергетического центра изображения КО.

Полученную математическую модель в дальнейшем предполагается использовать для проведения параметрического синтеза БОЭС.

Список используемых источников

1. *Арсеньев В.Н., Балувев С.Ю., Белихин Е.Н.* Обоснование требований к бортовым оптико-электронным средствам космических аппаратов наблюдения за обстановкой в космическом пространстве // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 665. – С. 167–172.

2. Оценивание характеристик точности определения координат космического объекта бортовыми оптико-электронными средствами космических аппаратов наблюдения за обстановкой в космическом пространстве / В.Н. Арсеньев, С.Ю. Балувев, Е.Н. Белихин и др. // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 666. – С. 173–179.

3. Минимальные технические характеристики звездного датчика ориентации, необходимые для достижения заданной погрешности / А.И. Захаров, М.Е. Прохоров, М.С. Тучин и др. // *Астрофизический бюллетень*. – 2013. – Т. 68, № 4. – С. 507–520.

4. *Андреев А.Л., Коротаев В.В.* Особенности расчета оптико-электронных систем позиционирования на основе готовых телевизионных модулей // *Известия вузов. Приборостроение*. – 2010. – № 10. – С. 69–75.

5. *Баранов П.С., Манцетов А.А.* Оптимизация отношения радиуса кружка рассеяния объектива к размеру пиксела для повышения точности оценки координат изображений малоразмерных объектов // *Известия вузов России. Радиоэлектроника*. – 2016. – № 2. – С. 49–53.

6. *Фираго В.А.* Определение оптимального радиуса гауссовой функции рассеяния объектива при обнаружении точечных объектов системами с дискретным представлением изображения // *Вестник БГУ*. – 2006. – № 1. – С. 28–33.

7. Классификация и анализ погрешности измерения координат объектов на кадрах звездного неба / М.Л. Беличенко, Р.В. Бессонов, Д.С. Завгородний и др. // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2017. – № 3. – С. 67–77.

8. *Замятин В.В.* Алгоритмы контроля координат источника излучения на фоточувствительной поверхности матрицы // *Ползуновский вестник*. – 2008. – № 3. – С. 350–355.

К.Б. Болдырев,
кандидат техн. наук, доцент;
А.Ю. Карчин;
И.Ю. Кубасов,
кандидат техн. наук;
А.А. Сасункевич,
кандидат техн. наук

ВЛИЯНИЕ СЕЗОННЫХ ФАКТОРОВ НА ВЫСОТУ РАЗРУШЕНИЯ ОТДЕЛЯЮЩИХСЯ ЧАСТЕЙ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ НА ПАССИВНОМ УЧАСТКЕ ТРАЕКТОРИИ

В публикации представлены результаты исследования зависимости параметров разрушения отделяющихся частей ракет-носителей на пассивном участке траектории от сезонных факторов атмосферы. Параметры разрушения отработавших ракетных блоков служат исходными данными баллистических расчетов и позволяют повысить достоверность прогнозирования координат точек падения фрагментов отделяющихся частей ракет-носителей.

Показано наличие влияния сезонных факторов на статистические характеристики высоты разрушения блока «А» ракеты-носителя типа «Союз» на пассивном участке траектории в различных атмосферных условиях.

Ключевые слова: ракета-носитель, ракетный блок, отделяющаяся часть, пассивный участок траектории.

ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе развития ракетостроения все ракеты-носители (РН) являются составными – многоступенчатыми, имеющими в своем составе несколько ракетных блоков. Отделяющиеся части (ОЧ) в процессе выведения космических аппаратов (КА) на орбиту, согласно циклограмме полета, отделяются от РН и падают в специально отведенных для этого участках на поверхности Земли – районах падения (РП). Границы РП, как правило, являются огибающей эллипсов рассеивания точек падения ОЧ РН.

При открытии новых трасс запусков КА и оценке достаточности уже используемых штатных РП необходимо проводить их баллистическое обоснование с учетом всех факторов, влияющих на их размеры. Решение указанной задачи осложняется возрастающими требованиями по минимизации РП из-за развития промышленной и сельскохозяйственной инфраструктуры, введения в хозяйственный оборот новых земель, ужесточения экологического законодательства, принятия новых земельных законов. Задача совершенствования моделей и методов прогнозирования размеров РП в сложившихся условиях становится актуальной [1].

При определении размеров РП учитывается множество факторов, приводящих к рассеиванию точек падения ОЧ: неопределенность их массы и аэродинамических характеристик, разброс начальных условий движения, вариации значений параметров атмосферы относительно номинальных значений, принятых при подготовке данных на пуски. Это позволяет обеспечить попадание ОЧ в границы РП. Однако при определении границ РП не всегда учитывался факт разрушения ОЧ при падении [2]. В процессе падения ОЧ РН вследствие аэротермодинамического воздействия атмосферы может разрушаться на фрагменты. Это происходит, например, при каждом пуске РН серии «Союз» во время падения второй ее ступени (рис. 1).

Разрушение ОЧ на фрагменты приводит к увеличению площади рассеивания точек падения, что может стать причиной выхода точек падения за границы РП. В настоящее время вопросы, связанные с разрушением ОЧ на фрагменты, слабо изучены. В частности, неизвестен диапазон высот разрушения ОЧ на фрагменты, а также закон распределения высоты разрушения, отсутствует модель разрушения.



Рис. 1. Разрушение блока «А» РН типа «Союз» на пассивном участке траектории

Следует отметить, что процесс разрушения ОЧ РН на фрагменты тесно связан с сезонными вариациями параметров атмосферы. Учет факта разрушения ОЧ на фрагменты в модели прогнозирования параметров РП позволит уточнить его границы.

ВЛИЯНИЕ СЕЗОННЫХ ВАРИАЦИЙ АТМОСФЕРЫ НА ОТКЛОНЕНИЕ ТОЧКИ ПАДЕНИЯ ОТДЕЛЯЮЩЕЙСЯ ЧАСТИ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ

Значительный вклад в размеры и положение эллипса рассеивания точек падения ОЧ РН вносят вариации параметров атмосферы. От параметров атмосферы зависят величины аэродинамических сил и моментов, действующих на ОЧ на ПУТ. Влияние сезонных вариаций атмосферы можно рассмотреть на примере локальных сезонных моделей, учитывающих среднемесячное изменение ее параметров и ветер в течение года, а также их вариации. Примеры таких моделей описаны в ОСТ 92-5165-92, ОСТ 92-9704-95. Локальные сезонные модели атмосферы активно разрабатываются в организациях Госкорпорации «Роскосмос», например в ФГУП «ЦЭНКИ» для использования в РП.

На рис. 2 представлены изменения отклонения плотности атмосферы от стандартной (ГОСТ 4401-81) в зависимости от высоты для локальной модели атмосферы ОСТ 92-5165-92 в январе и июле.

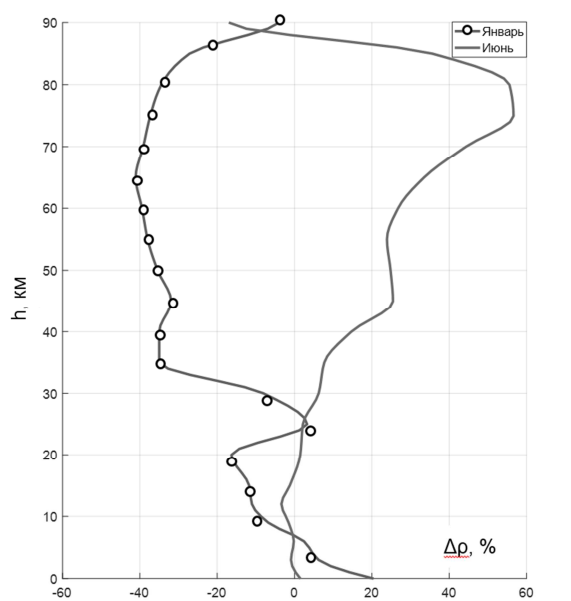


Рис. 2. Зависимость отклонения плотности атмосферы от стандартной

Изменение разности между плотностью атмосферы в июле и январе $\Delta\rho = \rho_{\text{июл}} - \rho_{\text{янв}}$ в зависимости от высоты показано в виде графика на рис. 3.

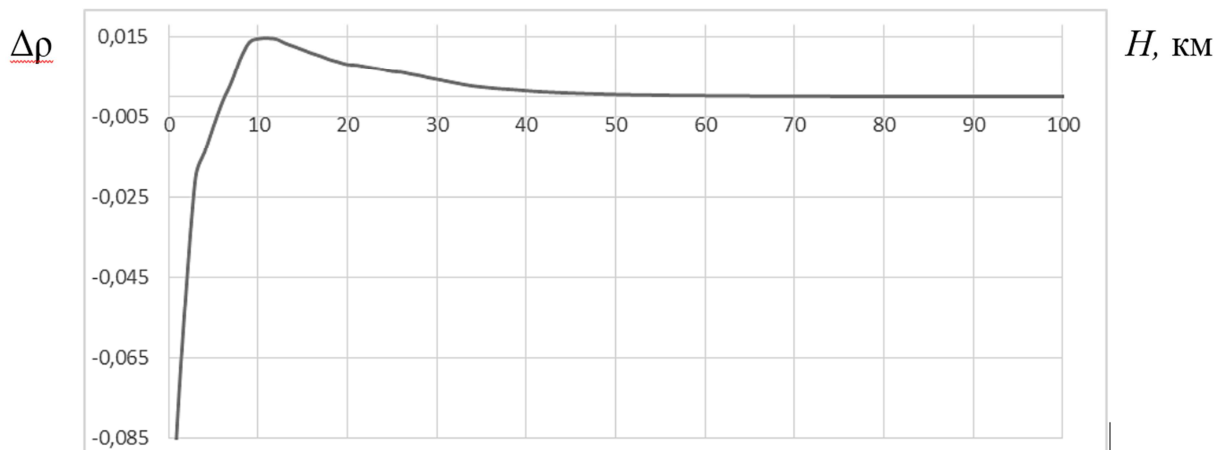


Рис. 3. Изменение разности плотностей атмосферы

Плотность атмосферы в теплые месяцы года на определенном интервале высот в основном больше, чем в холодные. Например, при сравнении плотности в январе и июле данная тенденция наблюдается для диапазона высот от 6,5 до 88 км.

Кроме того, одно и то же значение плотности, например $0,0004 \text{ кг/м}^3$, в июле достигается на высоте 60 км, а в январе – на высоте 55 км. Поэтому торможение ОЧ в теплые месяцы года начинается на больших высотах, чем в холодные. Все это приводит к уменьшению дальности полета ОЧ и уменьшению рассеивания точек падения, а как следствие – к уменьшению размеров ЭР точек падения и смещению его центра ближе к точке страта РН для теплых месяцев.

На отклонение точки падения ОЧ РН влияет ветер. Ветер помимо отклонения точки падения ОЧ по дальности, в отличие от остальных возмущающих факторов, вносит основной вклад в отклонение точек падения ОЧ РН в боковом направлении. На рис. 4 представлены зависимости средних значений зональной и меридиональной составляющих скорости ветра для января и июля.

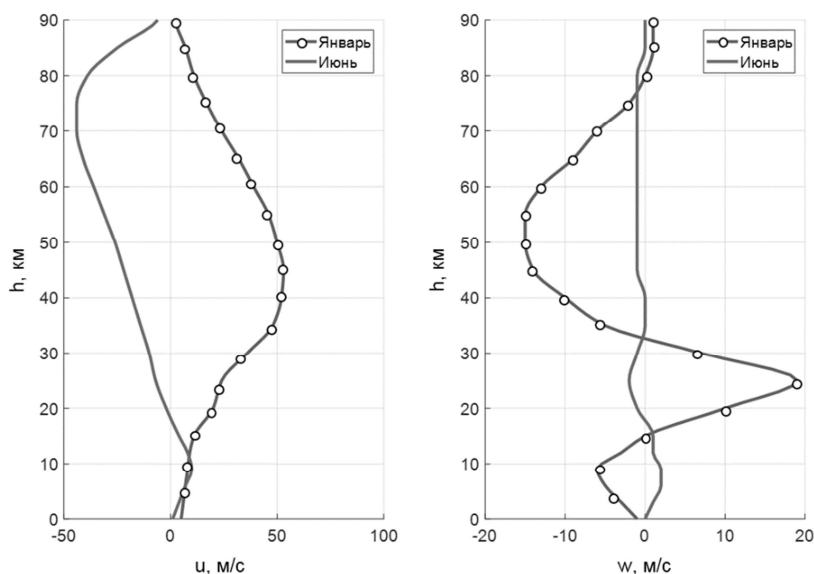


Рис. 4. Зависимость средних значений зональной и меридиональной составляющих ветра от высоты

Зональная составляющая вектора скорости ветра направлена по касательной к параллели, положительное направление – на восток. Меридиональная – по касательной к меридиану, положительное направление – на север.

Обобщенно влияние сезонных вариаций атмосферы наряду с действием других возмущающих факторов представлено на рис. 5 и 6.

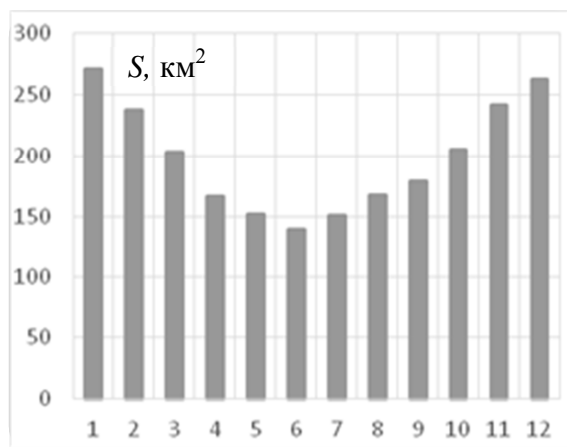


Рис. 5. Изменение площади эллипса рассеивания точек падения

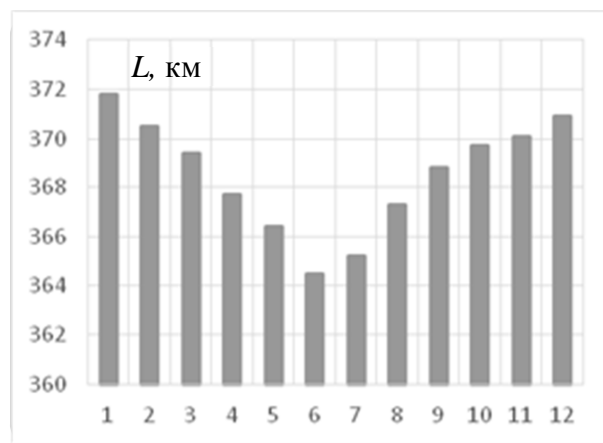


Рис. 6. Изменение линейной дальности от центра ЭР до точки старта

На рис. 5 и 6 представлены зависимости, определяющие изменение площади ЭР точек падения ОЧ (S) и изменение линейной дальности от центра эллипса рассеивания до точки старта РН (L) соответственно в зависимости от месяца пуска для бокового блока РН типа «Союз». Изменение параметров соответствует сезонным вариациям атмосферы.

Проводя анализ полученных данных, можно прийти к выводу, что характеристики ЭР зависят от сезонных вариаций параметров атмосферы, прежде всего плотности и ветра.

ВЛИЯНИЕ ВОЗМУЩАЮЩИХ ФАКТОРОВ АТМОСФЕРЫ НА МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ ОТДЕЛЯЮЩЕЙСЯ ЧАСТИ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ

Проектирование ракет космического назначения производится с учетом требования минимизации массы корпуса и других силовых конструкций. Силовой набор и геометрические размеры элементов несущих конструкций корпуса ракетных блоков выбираются с учетом величин внешних и внутренних сил, действующих на активном участке полета, при этом коэффициенты запаса несущей способности стремятся к единице. Самой большой по модулю силой на этом этапе является сила тяги ракетного двигателя. Ее направление проходит через центр масс субракеты и приводит к равноускоренному прямолинейному движению. Программные развороты вокруг центра масс производятся приложением дополнительных управляющих сил, не проходящих через центр масс. Величины этих сил намного ниже, чем сила тяги маршевой двигательной установки. В этих условиях напряженно деформированное состояние всей конструкции формируется осевыми сжимающими силами и изгибающими моментами, а действие перерезывающих сил не рассматривается.

На пассивном участке траектории на ОЧ РН действует совокупность сил, характеристики которых отличаются от тех, которые действуют на корпус на активном участке полета. Характер движения ОЧ РН на этом этапе обусловлен изменением значений скоростного напора $q(H)$, действующего на корпус ОЧ в плотных слоях атмосферы.

Параметры, определяющие значения скоростного напора, являются функцией от высоты ПУТ (изменение скоростного напора для блока «А» РН типа «Союз» показано на рис. 7).

Возрастание функции $q(H)$ влечет за собой появление ряда факторов, приводящих к потере несущей способности корпуса ОЧ РН (рис. 7). Нестационарное нагружение корпуса на этапе перехода к аэродинамически устойчивому полету действует непродолжительный момент времени и в данной статье не рассматривается в группе основных силовых факторов, разрушающих корпус.

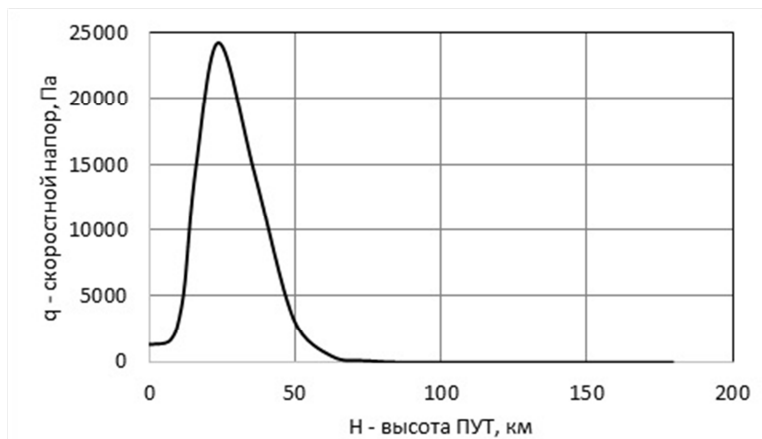


Рис. 7. Зависимость скоростного напора от высоты полета ОЧ РН

Первый фактор – это возрастание температуры элементов конструкции ОЧ РН вследствие аэродинамического нагрева. Этот фактор приводит к изменению прочностных свойств конструкционных материалов в сторону их снижения и возникновению температурных напряжений в корпусе ОЧ РН. К примеру, нагрев алюминиевого-магниевого сплава топливных баков АМг-6 до температуры 600 К снижает предел временного сопротивления разрушению σ_b на 30 %, материала сухих отсеков Д-19 – на 20 %. Также этот фактор приводит к нагреву остатков КРТ и возрастанию в баковых отсеках с криогенными компонентами избыточного давления. Так, например, жидкий кислород изменяет свое агрегатное состояние при температуре 90 К.

Второй фактор – возрастание значений продольных и перерезывающих сил, изгибающих и крутящих моментов вследствие появления значительной силы инерции от торможения ОЧ. Это приводит к увеличению механических напряжений в конструкционных материалах элементов конструкции ОЧ РН.

Как указывалось выше, параметры атмосферы изменяются в зависимости от времени года. Таким образом, основные причины разрушения корпуса ОЧ РН также меняются.

Применение моделей разрушения, учитывающих только аэродинамический нагрев обечайки корпуса ОЧ, не позволяет произвести расчет высот, на которых может произойти разрушение корпуса ОЧ, а также прогнозировать массово-габаритные характеристики фрагментов конструкции ОЧ РН. Наиболее адекватным является комплексный подход к выявлению всего спектра условий разрушения ОЧ, оценке влияния разрушения на характеристики РП ОЧ и учет его в моделях движения ОЧ РН [3].

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СЕЗОННОСТИ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ НА ДИАПАЗОН ВЫСОТ РАЗРУШЕНИЯ ОТДЕЛЯЮЩЕЙСЯ ЧАСТИ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ НА ПАССИВНОМ УЧАСТКЕ ТРАЕКТОРИИ

Основной целью исследования влияния сезонности параметров атмосферы на диапазон высот разрушения ОЧ РН являлось формирование представлений о характере распределения высоты разрушения корпуса ракетных блоков под воздействием аэродинамических сил на

ПУТ. Основным методом исследования был выбран численный эксперимент с использованием имитационного моделирования возмущающих факторов. Варьируемыми величинами являлись отклонения скоростей ветра и плотности воздуха по высоте (рис. 8).

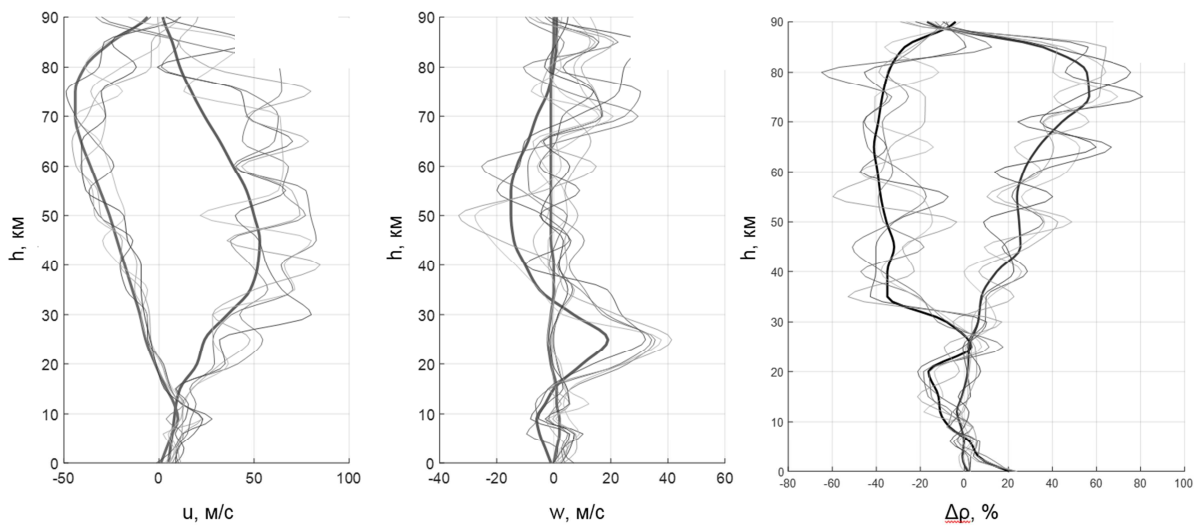


Рис. 8. Зависимости математических ожиданий зональной и меридиональной составляющих ветра и плотности воздуха от высоты (со случайными вариациями)

Запас несущей способности элементов прочностной модели корпуса ракетного блока определялся критериями потери несущей способности, полученными на основе эмпирических соотношений строительной механики.

Численный эксперимент проводился до момента потери несущей способности элемента корпуса в одном из сечений. Фиксировалась статистика реализации высоты разрушения.

В исследовании использовалась прочностная модель корпуса блока «А» ракеты-носителя серии «Союз», реализующая дискретное разрушение объекта на фрагменты типовых массо-габаритных размеров и аэродинамических форм. Применение такой модели позволяет прогнозировать баллистический спуск фрагментов ОЧ после разрушения, что повышает достоверность расчетов параметров эллипса рассеивания. Дискретность достигалась в результате перехода от реального корпуса ОЧ РН к расчетной схеме, в которой он состоит из элементов с известными прочностными свойствами. В конструктивных элементах с наименьшим запасом несущей способности назначались сечения вероятного разрушения. В ходе численного эксперимента в этих сечениях наблюдались условия не превышения действующей нагрузки над предельной. Всего в корпусе блока «А» РН типа «Союз» было выбрано шесть расчетных сечений (рис. 9).

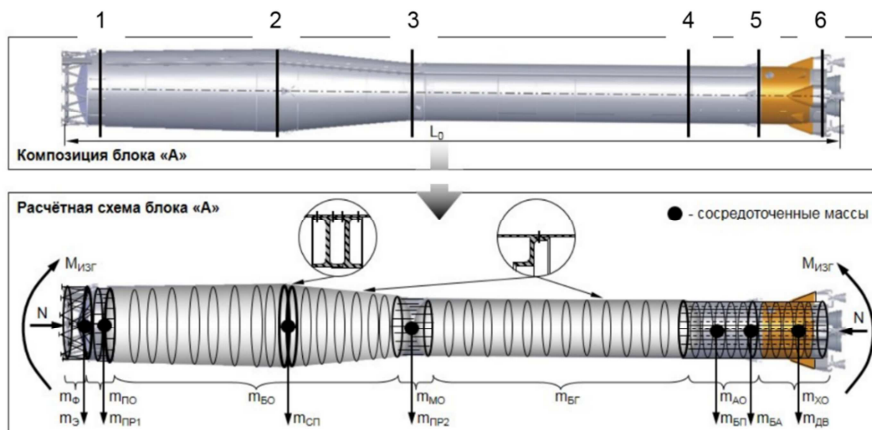


Рис. 9. Схема корпуса блока «А» с номерами расчетных сечений

Для оценки условий разрушения был выполнен расчет 100 траекторий движения блока «А» на ПУТ для двух месяцев при фиксированных сочетаниях начальных условий как по параметрам движения центра масс, так и относительно центра масс.

Расчеты для июня показали, что в большинстве случаев превышение предела прочности наступало в четвертом сечении. Кроме того, в четырех случаях одновременно с превышением предела прочности в четвертом сечении он был превышен и в пятом сечении. Это значит, что в этом случае блок «А» разрушался на три фрагмента.

В результате расчетов для января ОЧ РН на пассивном участке разрушалась в четвертом и пятом сечениях. В 13 случаях разрушение наступило на более низких высотах в третьем сечении – по причине потери прочности межбакового отсека.

Следует отметить, что в первом сечении продольное механическое напряжение на момент разрушения ЦБ характеризуется в основном величинами $(0,03-0,04) \cdot 10^8$ Па, что примерно в 100 раз меньше предела прочности, а во втором сечении продольное напряжение преимущественно характеризуется величинами $0,4 \cdot 10^8$ Па, что в 10 раз меньше предела прочности. Этот факт говорит о том, что первое и второе сечения возможно исключить из характерных сечений разрушения корпуса ОЧ РН.

В результате проведенных расчетов получены гистограммы высоты разрушения для января и июля (рис. 10).

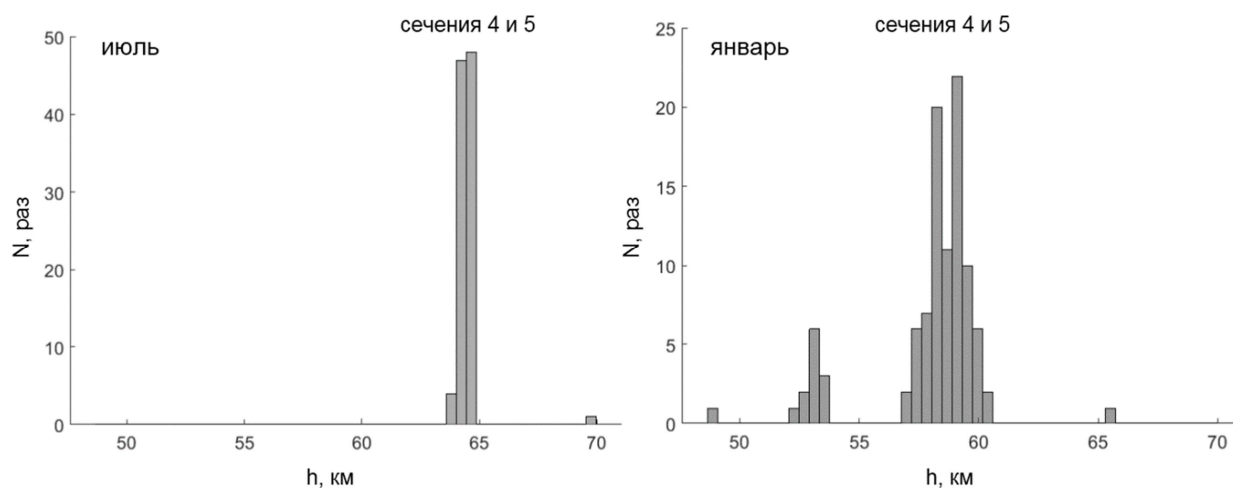


Рис. 10. Гистограммы высоты разрушения для разных месяцев

Разрушение в июле происходило на узком диапазоне высот с несимметричным распределением плотности вероятности. Это объясняется преобладающим воздействием изгибающего момента, действующего на корпус ОЧ вследствие возрастания центробежного ускорения при вращении блока в совокупности с ростом изгибающей силы от скоростного напора.

В холодное время года разрушение происходило в более плотных слоях атмосферы в широком диапазоне высот. Распределение плотности вероятности представляло собой форму, качественно близкую к двумодальной. Это объясняется сравнительно равной прочностью корпуса в сечениях четыре и пять. На этом диапазоне высот разрушение может произойти в двух сечениях, что приводит к увеличению числа фрагментов. Разрушение в третьем сечении происходило на высотах с преобладающим воздействием скоростного напора. Таким образом, в результате исследований установлен факт влияния сезонных факторов на статистические характеристики высоты разрушения ОЧ РН.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сезонные вариации атмосферы сказываются на диапазоне высоты разрушения ОЧ РН на ПУТ. Результаты исследования статистических характеристик высоты разрушения служат исходными данными для баллистических расчетов и позволяют повысить достоверность информации о координатах точек падения фрагментов конструкции ОЧ РН. Актуальными представляются дальнейшие исследования с целью установления закона распределения высоты разрушения ОЧ РН на ПУТ.

Список используемых источников

1. *Богачев С.А., Кубасов, И.Ю., Булекбаев Д.А.* Проблемные вопросы математического моделирования движения отделяющихся частей ракет космического назначения для оценивания характеристик рассеивания точек падения // Труды всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы улучшения ГТХ РКТ, ее создания, испытания и эксплуатации». – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2013. – 241 с.
2. Методика определения характеристик районов падения отделяющихся частей ракет-носителей с учетом разрушения отделяющихся частей и оперативных данных о состоянии атмосферы / С.А. Богачев, Д.А. Булекбаев, И.Ю. Кубасов и др. // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2012. – Вып. 635. – С. 14–17.
3. Проблемные вопросы использования трасс запусков космических аппаратов и районов падения отделяющихся частей ракет космического назначения: монография / В.В. Авдошкин, Н.В. Аверкиев, А.А. Ардашов и др.; под ред. А.С. Фадеева, Н.В. Аверкиева. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. – 372 с.

Р.М. Вивчарь;
А.В. Пачин;
Д.В. Решетников,
кандидат техн. наук, доцент

ОЦЕНИВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ЗАПУСКОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГОТОВНОСТИ РАКЕТЫ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ К ПУСКУ

В публикации рассмотрено влияние интенсивности запусков космических аппаратов военного назначения на оптимальные значения параметров системы обеспечения готовности ракеты космического назначения к пуску, позволяющие обеспечить требуемую вероятность подготовки и пуска ракеты космического назначения за заданное время при минимизации эксплуатационных затрат. Представлена количественная оценка этого влияния на основе рассчитанных оптимальных значений параметров системы обеспечения готовности ракеты космического назначения к пуску для различных интенсивностей запусков космических аппаратов. Выработаны и приведены практические рекомендации и предложения по проведению комплекса мероприятий на основе полученных оптимальных значений параметров системы обеспечения готовности ракеты космического назначения к пуску.

Ключевые слова: ракета космического назначения, ракета-носитель, система обеспечения готовности, интенсивность запусков космических аппаратов, технологическая операция.

Одним из показателей эффективности системы обеспечения готовности (СОГ) ракеты космического назначения (РКН) к пуску является вероятность подготовки и пуска РКН за заданное время. В настоящее время эта вероятность не соответствует требуемому значению ($P_m \geq 0,98$), определенному в общих технических требованиях к вооружению и военной технике.

На вероятность подготовки и пуска РКН за заданное время влияют параметры СОГ РКН к пуску, такие как количество запасных частей (ЗЧ) элементов замены (ЭЗ), время их доставки, уровень обученности личного состава боевого расчета, характеризующийся временем устранения отказа оборудования (Об), периодичность контроля технического состояния (ТС) оборудования. В свою очередь, эти параметры влияют и на эксплуатационные затраты. Требованиями руководящих документов определена необходимость минимизации этих затрат с учетом сохранения показателей эффективности. Исходя из этого, добиться требуемой вероятности подготовки и пуска РКН за заданное время при минимизации эксплуатационных затрат возможно путем определения оптимальных значений параметров СОГ РКН к пуску и проведения комплекса мероприятий на основе этих значений.

Однако в период непосредственной угрозы агрессии необходимо проведение комплекса мероприятий по наращиванию и восполнению орбитальной группировки космических аппаратов (КА) военного назначения (ВН) за короткий отрезок времени, что обуславливает резкое увеличение интенсивности запусков КА, которая, в свою очередь, влияет на оптимальные значения параметров СОГ РКН к пуску [4].

В настоящей статье рассматривается влияние интенсивности запусков КА ВН на оптимальные значения параметров СОГ РКН к пуску на примере процесса подготовки ракеты-носителя среднего класса.

В рамках решения задачи обеспечения требуемой вероятности подготовки и пуска РКН за заданное время была разработана методика выбора оптимальных значений параметров СОГ РКН к пуску [4], структурно-логическая схема которой представлена на рис. 1.

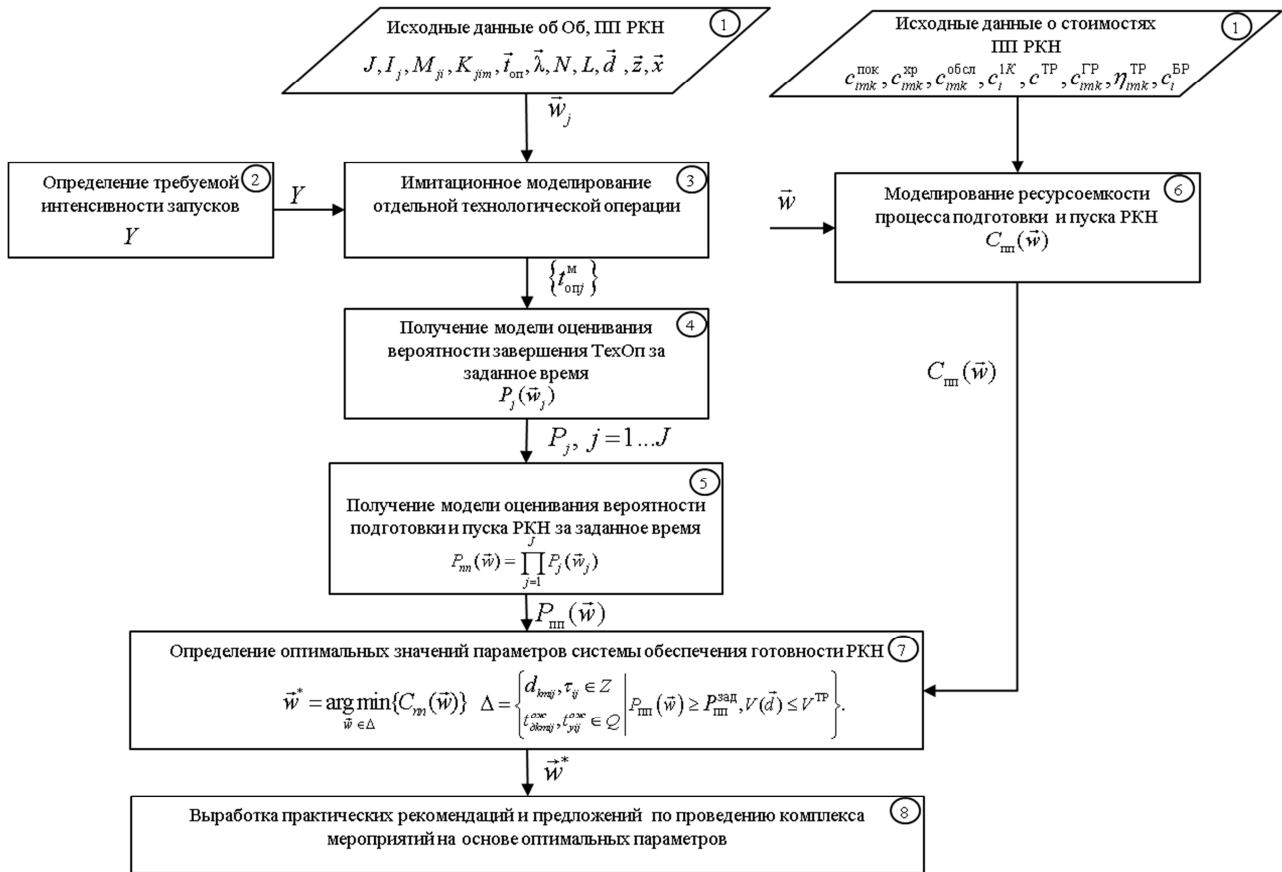


Рис. 1. Структурно-логическая схема методики выбора значений параметров системы обеспечения готовности РКН к пуску

Указанная методика позволяет оценить влияние интенсивности запусков космических аппаратов на оптимальные значения параметров СОГ (1):

$$\vec{w}^* = [\vec{w}_1^*, \vec{w}_2^*, \dots, \vec{w}_j^*, \dots, \vec{w}_J^*]^T. \tag{1}$$

Здесь \vec{w}_j^* – вектор оптимальных значений параметров СОГ РКН к пуску, обеспечивающих проведение j -й технологической операции (ТехОп),

$$\vec{w}_j^* = [\vec{d}_j^*, \vec{t}_{dj}^{ож*}, \vec{t}_{yj}^{ож*}, \vec{\tau}_j^*]^T,$$

где \vec{d}_j^* – вектор количеств ЗЧ k -го ЭЗ m -й СЧ i -го вида Об, участвующего в j -й ТехОп, $\vec{d}_j^* = [d_{1mij}^*, d_{2mij}^*, \dots, d_{kmij}^*, \dots, d_{K_{mij}mij}^*]^T$, $i = \overline{1, I_j}$, $m = \overline{1, M_{ij}}$, $k = \overline{1, K_{mij}}$;

$\vec{t}_{dj}^{ож*}$ – вектор, содержащий значения ожидаемого времени доставки ЗЧ k -го ЭЗ m -й СЧ i -го вида Об, участвующего в j -й ТехОп, $\vec{t}_{dj}^{ож*} = [t_{d1mij}^{ож*}, t_{d2mij}^{ож*}, \dots, t_{dkmij}^{ож*}, \dots, t_{dK_{mij}mij}^{ож*}]^T$, $i = \overline{1, I_j}$, $m = \overline{1, M_{ij}}$, $k = \overline{1, K_{mij}}$;

$\vec{t}_{yj}^{ож*}$ – вектор, содержащий значения ожидаемого времени устранения отказа БР i -го вида Об, участвующего в j -й ТехОп, $\vec{t}_{yj}^{ож*} = [t_{y1j}^{ож*}, t_{y2j}^{ож*}, \dots, t_{yij}^{ож*}, \dots, t_{yI_jj}^{ож*}]^T$, $i = \overline{1, I_j}$;

$\vec{\tau}_j^*$ – вектор периодичностей контроля ТС i -го вида ТлОб, участвующего в j -й ТехОп, $\vec{\tau}_j^* = [\tau_{1j}^*, \tau_{2j}^*, \dots, \tau_{ij}^*, \dots, \tau_{I_jj}^*]^T$, $i = \overline{1, I_j}$, которые обеспечат требуемое значение указанной вероятности подготовки и пуска РКН за заданное время при минимизации эксплуатационных затрат.

Для оценивания влияния интенсивности запусков определим оптимальные значения параметров СОГ РКН к пуску для двух различных интенсивностей запусков КА.

На шаге 1 методики происходит ввод исходных данных, представленных в табл. 1 и 2. К ним относятся следующие:

$\vec{\lambda}$ – вектор интенсивностей отказов ЭЗ оборудования, участвующего в j -й ТехОп;

\vec{d} – вектор количеств запасных частей ЭЗ оборудования, участвующего в j -й ТехОп;

\vec{z} – вектор периодов пополнения запасных частей ЭЗ оборудования, участвующего в j -й ТехОп;

\vec{x} – вектор, характеризующий стратегии технического обслуживания Об, участвующего в j -й ТехОп;

L – множество параметров закона бета-распределения времени доставки запасных частей ЭЗ оборудования, участвующего в j -й ТехОп;

N – множество параметров закона бета-распределения времени устранения отказа боевым расчетом (БР) Об, участвующего в j -й ТехОп;

$t_{оп}$ – продолжительность выполнения ТехОп согласно технологическому графику подготовки;

$\vec{c}_j^{пок}$ – вектор, характеризующий стоимости покупки ЗЧ ТлОб, участвующего в j -й ТехОп;

\vec{c}_j^{xp} – вектор, характеризующий стоимости хранения ЗЧ ТлОб, участвующего в j -й ТехОп;

$\vec{c}_j^{обсл}$ – вектор, характеризующий стоимости обслуживания ЗЧ ТлОб, участвующего в j -й ТехОп;

\vec{c}_j^{1K} – вектор, характеризующий стоимости проведения одного контроля ТС ТлОб, участвующего в j -й ТехОп;

$\vec{c}_j^{БР}$ – вектор, характеризующий затраты на обучение БР ТлОб, участвующего в j -й ТехОп;

C_{dj} – множество стоимостей вариантов доставки ЗЧ ТлОб, участвующего в j -й ТехОп.

Таблица 1

Исходные значения параметров СОГ РКН к пуску

№ ТехОп	Исходные значения параметров						
	$\vec{\lambda} \cdot 10^{-6}, \text{ч}^{-1}$	\vec{d} , шт	\vec{z} , ч	L	\vec{x}	N	$t_{оп}$, ч
1	$[244, 111]^T$	$[2, 1]^T$	$[8760, 8760]^T$	$\{\{2, 24, 1.5, 4\}, \dots\}$	$[1, 0, 0]^T$	$\{1, 5, 2.5, 4.5\}$	7.5
2	$[132, \dots]^T$	$[2, 1, 1]^T$	$[8760, 8760]^T$	$\{\{4, 20, 2.5, 4\}, \dots\}$	$[1, 0, 0]^T$	$\{1, 8, 1.5, 3.5\}$	2.5
...
42	$[78, \dots]^T$	$[1, 3, 2, 1]^T$	$[8760, 8760]^T$	$\{\{3, 28, 3, 7\}, \dots\}$	$[1, 0, 0]^T$	$\{0.5, 5, 2, 4\}$	2

Таблица 2

Исходные данные о стоимости процесса подготовки РКН

№ ТехОп	Исходные данные о стоимости процесса подготовки РКН					
	$\vec{c}_j^{пок}$	\vec{c}_j^{xp}	$\vec{c}_j^{обсл}$	\vec{c}_j^{1K}	$\vec{c}_j^{БР}$	C_{dj}
1	$[5, \dots]^T$	$[2, \dots]^T$	$[2, \dots]^T$	$[20, \dots]^T$	$[1, \dots]^T$	$\{5, \dots\}$
2	$[7, \dots]^T$	$[2, \dots]^T$	$[1, \dots]^T$	$[18, \dots]^T$	$[1, \dots]^T$	$\{7, \dots\}$
...
42	$[8, \dots]^T$	$[2, \dots]^T$	$[2, \dots]^T$	$[15, \dots]^T$	$[1, \dots]^T$	$\{4, \dots\}$

Далее согласно структурно-логической схеме методики на шаге 2 необходимо определить интенсивность запусков КА. В первом случае примем интенсивность запуска $Y = 1$ в месяц. На шаге 3 происходит имитационное моделирование процесса выполнения каждой ТехОп, результатом которого является получение выборки времен их завершения. Далее по известным критериям согласия (в качестве таких были использованы критерии Пирсона и Колмогорова – Смирнова [5]) было определено, что выборки сходятся к закону бета-распределения с различными параметрами. Плотности вероятности времен завершения каждой ТехОп представлены на рис. 2.

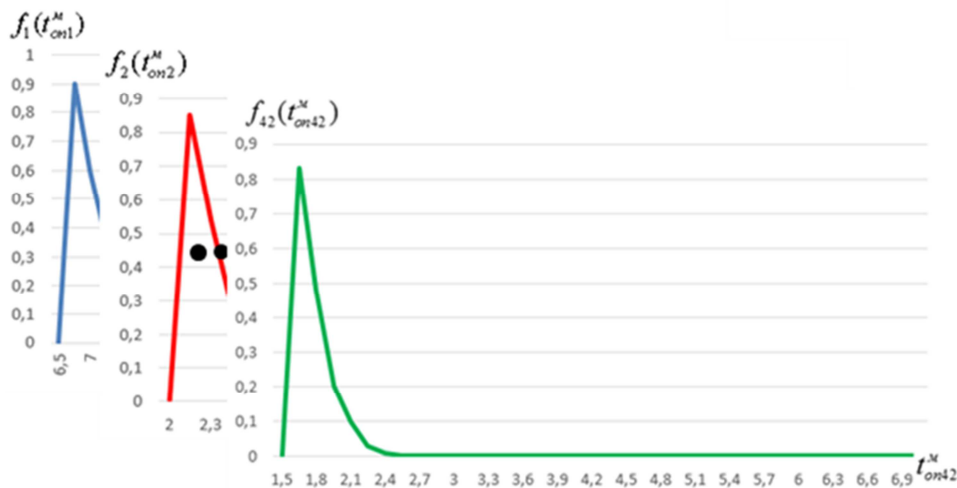


Рис. 2. Плотности вероятности времен завершения ТехОп

На шаге 4 с помощью многофакторного регрессионного анализа были получены модели вероятности завершения каждой ТехОп за заданное время, выражающие эту вероятность через параметры СОГ РКН к пуску. Общий вид таких моделей и более детальное описание представлены в [4]. Для примера рассмотрим модели трех первых ТехОп:

$$P_1 = 1 - 0,0499(1 - r_{1111})t_{д1111}^{ож} - 0,0362(1 - r_{2111})t_{д2111}^{ож} - 0,0143t_{y11}^{ож} - 0,000004\tau_{11} \quad (2)$$

$$P_2 = 1 - 0,0411(1 - r_{1112})t_{д1112}^{ож} - 0,0262(1 - r_{2112})t_{д2112}^{ож} - 0,0225(1 - r_{3112})t_{д3112}^{ож} - \\ - 0,014t_{y12}^{ож} - 0,000003\tau_{12} \quad (3)$$

$$P_3 = 1 - 0,0214(1 - r_{1113})t_{д1113}^{ож} - 0,0132(1 - r_{2113})t_{д2113}^{ож} - 0,009(1 - r_{3113})t_{д3113}^{ож} - \\ - 0,011(1 - r_{4113})t_{д4113}^{ож} - 0,0118t_{y13}^{ож} - 0,000004\tau_{13} \quad (4)$$

Оценка адекватности полученных моделей была проведена с помощью критерия, основанного на коэффициенте детерминированности.

Далее, на шаге 5, была получена зависимость вероятности завершения всего процесса за заданное время:

$$P_{mn} = \prod_{j=1}^{42} P_j. \quad (5)$$

Результаты моделирования ресурсоемкости процесса подготовки РКН [2], выполняемого на шаге 6, являются одной из составляющих исходных данных, необходимых для выполнения шага 7.

На шаге 7 для определения оптимальных значений параметров СОГ РКН к пуску целесообразно, используя метод динамического программирования [1], получить множества Парето-оптимальных решений для каждой операции [4]. При этом в ходе решения задачи определения оптимальных значений параметров СОГ было учтено ограничение не только на вероятность завершения ТехОп за заданное время, но и на суммарный объем, отводимый для хранения ЗЧ. На рис. 3 в качестве примера представлен полученный образ множества Парето-оптимальных решений в пространстве затрачиваемых денежных средств и выделяемых объемов для хранения ЗЧ для первой ТехОп при заданной интенсивности запуска КА $Y = 1$.

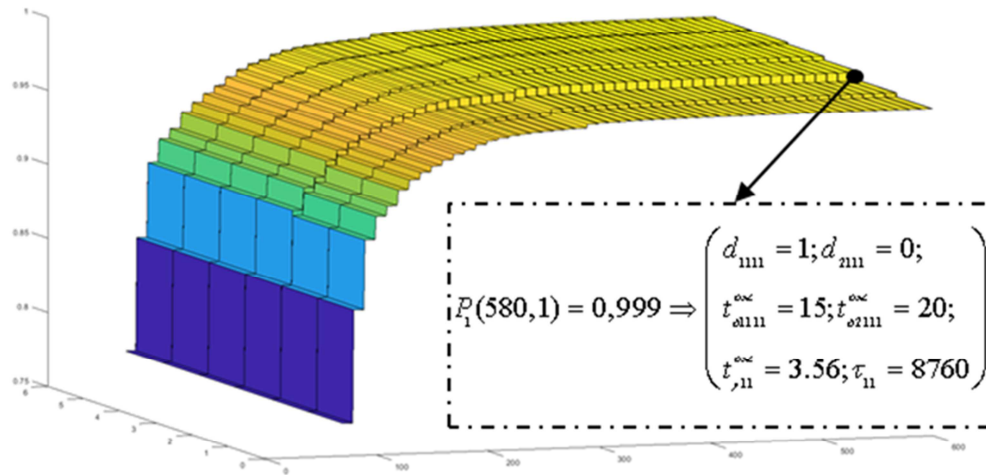


Рис. 3. Образ множества Парето-оптимальных решений в пространстве затрачиваемых денежных средств и выделяемых объемов для хранения ЗЧ для первой ТехОп при $Y = 1$

Соответствующие образы были получены для всех ТехОп.

Далее, используя полученные множества Парето-оптимальных решений для каждой ТехОп, с помощью метода динамического программирования было получено множество Парето-оптимальных решений для всего процесса. Образ этого множества представлен на рис. 4.

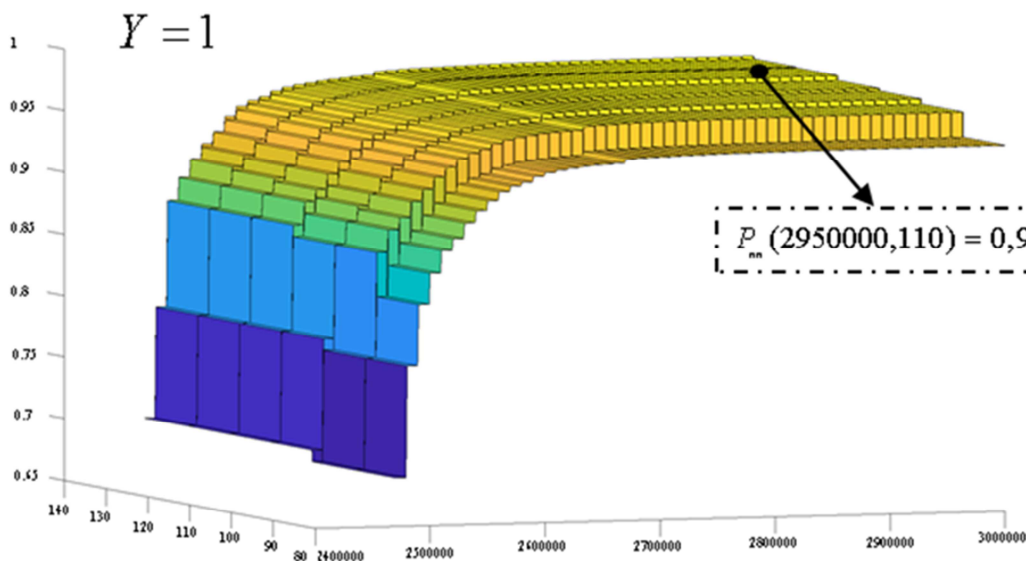


Рис. 4. Образ множества Парето-оптимальных решений для всего процесса в пространстве затрачиваемых на него денежных средств и суммарного объема, выделяемого для хранения ЗЧ при $Y = 1$

Полученное множество Парето-оптимальных решений позволило найти значения параметров СОГ РКН к пуску (табл. 3), которые обеспечат требуемую вероятность подготовки и пуска РКН за заданное время, равную 0,98.

Таблица 3

Оптимальные значения параметров СОГ РКН к пуску при $Y = 1$

$P_{\text{ин}}(2950000, 110) = 0.98$	$\xi_1 = 580, \zeta_1 = 1$	\vec{d}_1^*	$\vec{t}_{d1}^{\text{ожк}*}$	$\vec{t}_{y1}^{\text{ожк}*}$	$\vec{\tau}_1^*$
		$[1, 0]^T$	$[15, 20]^T$	$[3.56]^T$	$[8760]^T$
	$\xi_2 = 1100, \zeta_2 = 3$	\vec{d}_2^*	$\vec{t}_{d2}^{\text{ожк}*}$	$\vec{t}_{y2}^{\text{ожк}*}$	$\vec{\tau}_2^*$
		$[0, 0, 1]^T$	$[15, 12, 15]^T$	$[3.56]^T$	$[8760]^T$

	$\xi_{42} = 2100, \zeta_{42} = 6$	\vec{d}_3^*	$\vec{t}_{d2}^{\text{ожк}*}$	$\vec{t}_{y3}^{\text{ожк}*}$	$\vec{\tau}_3^*$
$[1, 0, 0, 0]^T$		$[14, 20, 20, 15]^T$	$[3.56]^T$	$[8760]^T$	

Далее, чтобы продемонстрировать влияние интенсивности запуска КА ВН на значения параметров СОГ РКН к пуску, был проделан ранее описанный алгоритм при интенсивности запусков КА – $Y = 2$ запуска в месяц. При этом стоит отметить, что при увеличении интенсивности запусков КА наблюдаются изменения в выражениях (2)–(4) значений коэффициентов регрессии. Это является следствием того, что такая интенсивность запусков предполагает начинать процесс подготовки РКН к пуску практически один за другим, что, в свою очередь, приводит к невозможности проведения всего комплекса мероприятий, направленного на приведение технологического оборудования в готовность к применению по назначению. В связи с этим при каждой последующей подготовке РКН к пуску увеличивается вероятность отказа оборудования, что при невозможности своевременного пополнения комплекта ЗИП повышает вероятность не застать в нем требуемую для устранения отказа ЗЧ и приводит к необходимости ее экстренной доставки. Возможное увеличение числа отказов также обуславливает необходимость снижения времени, затрачиваемого на их устранение, и, как следствие, повышение уровня обученности БР. Все эти обстоятельства приводят к увеличению веса вклада параметров СОГ РКН к пуску в значении вероятности завершения ТехОп процесса подготовки РКН за заданное время и, следовательно, к указанному выше изменению коэффициентов регрессии.

В результате выполнения всех шагов алгоритма методики было получено множество Парето-оптимальных решений для всего процесса, образ которого представлен на рис. 5.

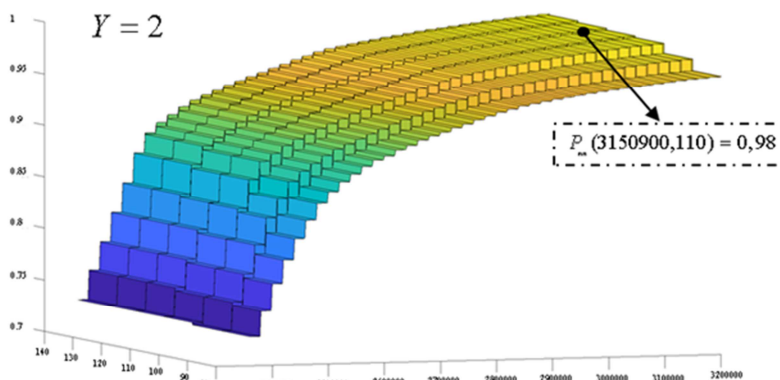


Рис. 5. Образ множества Парето-оптимальных решений для всего процесса в пространстве затрачиваемых на него денежных средств и суммарного объема, выделяемого для хранения ЗЧ при $Y = 2$

Чтобы обеспечить вероятность завершения процесса за заданное время $P_{\text{пл}} = 0.98$, необходимо затратить на процесс подготовки и пуска денежные средства в размере $\xi = 3150900$ у.е. и выделить суммарный объем, отводимый для хранения ЗЧ $\zeta = 110$. Значения параметров СОГ РКН к пуску, соответствующие этому решению приведены в табл. 4.

Таблица 4

Оптимальные значения параметров СОГ РКН к пуску при $Y = 2$

$P_{\text{пл}}(3150900, 110) = 0.98$	$\xi_1 = 660, \zeta_1 = 2$	\vec{d}_1^*	$\vec{t}_{d1}^{\text{ож}^*}$	$\vec{t}_{y1}^{\text{ож}^*}$	$\vec{\tau}_1^*$
		$[1, 1]^T$	$[15, 15]^T$	$[3.10]^T$	$[8760]^T$
	$\xi_2 = 1150, \zeta_2 = 3$	\vec{d}_2^*	$\vec{t}_{d2}^{\text{ож}^*}$	$\vec{t}_{y2}^{\text{ож}^*}$	$\vec{\tau}_2^*$
		$[0, 0, 1]^T$	$[10, 12, 15]^T$	$[3.2]^T$	$[8760]^T$

	$\xi_{42} = 2350, \zeta_{42} = 6$	\vec{d}_3^*	$\vec{t}_{d3}^{\text{ож}^*}$	$\vec{t}_{y3}^{\text{ож}^*}$	$\vec{\tau}_3^*$
$[1, 0, 1, 0]^T$		$[14, 20, 15, 15]^T$	$[3.56]^T$	$[8760]^T$	

Несложно заметить, что при увеличении интенсивности запусков КА добиться вероятности завершения процесса за заданное время, равной 0,98, удается при большем выделении денежных средств, что является следствием изменения значений параметров СОГ РКН к пуску (см. табл. 3 и 4). Приведенный вывод свидетельствует о зависимости параметров СОГ РКН к пуску от интенсивности запусков КА, что, в свою очередь, определяет необходимость учета возможного изменения запуска КА.

Полученные значения параметров для интенсивности, равной двум запускам в месяц, определяют необходимость выработки на их основе практических рекомендаций и предложений по проведению комплекса эксплуатационных мероприятий, таких как:

- изменение плана обучения личного состава БР действиям при возникновении отказа в процессе проведения ТехОп в части, касающейся увеличения времени обучения на 4 ч. (это обусловлено тем, что при увеличении интенсивности запусков КА в два раза оптимальное значение времени устранения отказа оборудования уменьшается на 5–8 % и, следовательно, добиться такого снижения возможно путем увеличения времени обучения личного состава боевого расчета [2]);

- внесение изменений в ведомость ЗИП в части, касающейся увеличения количества ЗЧ (для того, чтобы добиться требуемой вероятности подготовки и пуска РКН за заданное время при увеличении запуска КА необходимо большее суммарное количество хранимых ЗЧ);

- внесение изменений в план проведения технических обслуживаний на ТлОб в части, касающейся изменения периодичности контроля ТС 2-го вида ТлОб с 8760 ч. на 4380 ч.;

- внесение изменений в план экстренных поставок ЗЧ, заключающихся в указании необходимого варианта доставки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье на примере процесса подготовки РН среднего класса к пуску было показано влияние интенсивности запуска КА военного назначения на параметры СОГ РКН к пуску. Были получены образы множества Парето-оптимальных решений для всего процесса в пространстве затрачиваемых на него денежных средств и суммарного объема, выделяемого для хранения ЗЧ при различной интенсивности запусков КА военного назначения. Получена количественная оценка влияния интенсивности запусков на параметры СОГ РКН к пуску.

Представлены рекомендации и предложения по проведению комплекса мероприятий на основе оптимальных значений параметров СОГ, которые позволят обеспечить требуемую вероятность завершения процесса за заданное время при увеличении интенсивности запусков КА в два раза.

Использование в качестве исходных данных методики реальных сведений о процессе подготовки РКН к пуску и его стоимости позволит получить оптимальные значения параметров СОГ, которые обеспечат требуемую вероятность подготовки и пуска РКН за заданное время при минимизации эксплуатационных затрат в условиях различной интенсивности запусков КА.

Список используемых источников

1. Беллман Р., Дрейфус С. Прикладные задачи динамического программирования. – М.: Наука, 1965. – 267 с.
2. Боровиков И.Г., Щербина И.С. Анализ научно-методического обеспечения процесса формирования боевого расчета подготовки и запуска космических аппаратов // Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники: сборник научных статей по материалам III Всероссийской научно-практической конференции. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. – С. 31–35.
3. Модель ресурсоемкости процесса подготовки и пуска РКН / Р.М. Вивчарь, А.В. Пачин, Д.В. Решетников и др. // Современные наукоемкие технологии. – 2019. – №7. – С. 15–19.
4. Вивчарь Р.М., Герасименко С.Ю., Решетников Д.В. Методика выбора значений параметров системы обеспечения готовности ракеты космического назначения к пуску // Современные наукоемкие технологии. – 2019. – №10. – С. 32–37.
5. Вентцель Е.С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения: учеб. пособие для втузов. – 2-е изд. – М.: Высшая школа, 2000. – 480 с.

И.Ю. Возмищев,
кандидат техн. наук;
В.В. Клейменов,
доктор техн. наук, профессор

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОГРАНИЧЕНИЙ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ОПОРНОЙ ЗВЕЗДЫ, СВЯЗАННЫХ С УРОВНЕМ ТУРБУЛЕНТНОСТИ АТМОСФЕРЫ, ПРИ НАБЛЮДЕНИЯХ ЗА КОСМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

Представлены аналитические зависимости оценивания граничных условий применения натриевой лазерной опорной звезды, при которых компенсация атмосферных фазовых искажений эффективна. Рассматриваются ограничения, связанные с соотношением случайного среднеквадратического углового отклонения лазерного луча в турбулентной атмосфере к углу изопланатизма, которые, в свою очередь, зависят от параметра r_0 .

Ключевые слова: турбулентная атмосфера, адаптивная оптика, угол изопланатизма, лазерная опорная звезда, радиус когерентности, дисперсия дрожания лазерного луча.

ВВЕДЕНИЕ

Значительные научно-технические достижения в астрономии при получении оптических изображений естественных космических объектов (КО) с высоким разрешением стали возможны благодаря развитию и внедрению новых технологий при разработке крупногабаритных (диаметром 6–10 м) оптических телескопов. Это обусловлено в первую очередь тем, что основные характеристики телескопа, такие как собирающая способность, проникающая сила и разрешающая способность, зависят прежде всего от размера его апертуры. В то же время амплитудно-фазовые искажения оптического излучения при его прохождении через турбулентную атмосферу приводят к значительному ухудшению данных характеристик. Для компенсации атмосферных искажений широкое применение находят методы адаптивной оптики.

Для эффективной работы адаптивных оптических систем необходима яркая естественная звезда, расположенная вблизи КО (в пределах угла изопланатизма атмосферы θ_n). Так как найти естественную звезду требуемой звездной величины в пределах угла θ_n наблюдаемого КО маловероятно, то в поле зрения телескопа с помощью источника лазерного излучения мощностью несколько десятков ватт на длине волны $\lambda = 0,589$ мкм создают искусственную опорную звезду на высоте 90–100 км за счет резонансного рассеяния излучения свободными атомами натрия. Метод использования искусственной лазерной опорной звезды (ЛОЗ) широко используется за рубежом в астрономических телескопах [1, 2]. Очевидно, что данный метод применим и при наблюдении космических аппаратов (КА), однако ему свойственен ряд ограничений.

Существующие ограничения, связанные с особенностями формирования (генерации) натриевой ЛОЗ, рассмотрены в работах [2, 3], с фокусным и угловым анизопланатизмом – в работах [2, 4], дрожанием лазерного луча при его прямом и обратном распространении – в работах [6–9]. Однако указанные ограничения для использования натриевых ЛОЗ рассматриваются для астрономических крупных телескопов, размещенных, как правило, в горах на высотах 2–4 км. В условиях РФ при размещении оптико-лазерных средств на более низких высотах влияние атмосферной турбулентности на эффекты распространения лазерного луча значительно возрастает, особенно на его дрожание. Вследствие этого амплитудно-фазовые искажения оптического излучения значительно увеличиваются, прежде всего выражающиеся в дрожании лазерного пучка. В связи с этим проанализируем ограничения, связанные с дро-

жанием лазерного пучка, формирующего натриевую ЛОЗ, в наземных оптико-лазерных средствах наблюдения за космическими объектами.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЙ РАДИУСА КОГЕРЕНТНОСТИ АТМОСФЕРЫ ПРИ РАБОТЕ ПО КОСМИЧЕСКИМ ОБЪЕКТАМ

Рассмотрим общую схему работы наземной адаптивной оптической системы получения изображений низкоорбитальных КА. При слежении за низкоорбитальными КА луч лазера для формирования ЛОЗ необходимо направлять в непосредственной близости с видимым положением КА в пределах угла $\theta_{и}$, что пояснено на рис. 1. В системах фокусирования необходимо работать с упреждением на угле $\theta_{упр} = 2v/c$, где v – скорость КА; c – скорость света, т.е. оптическая ось зондирующего луча должна быть направлена в сторону 2 (рис. 1). Но и в этом случае натриевая ЛОЗ должна быть сформирована в пределах угла $\theta_{и}$ относительно прогнозируемого положения КА.

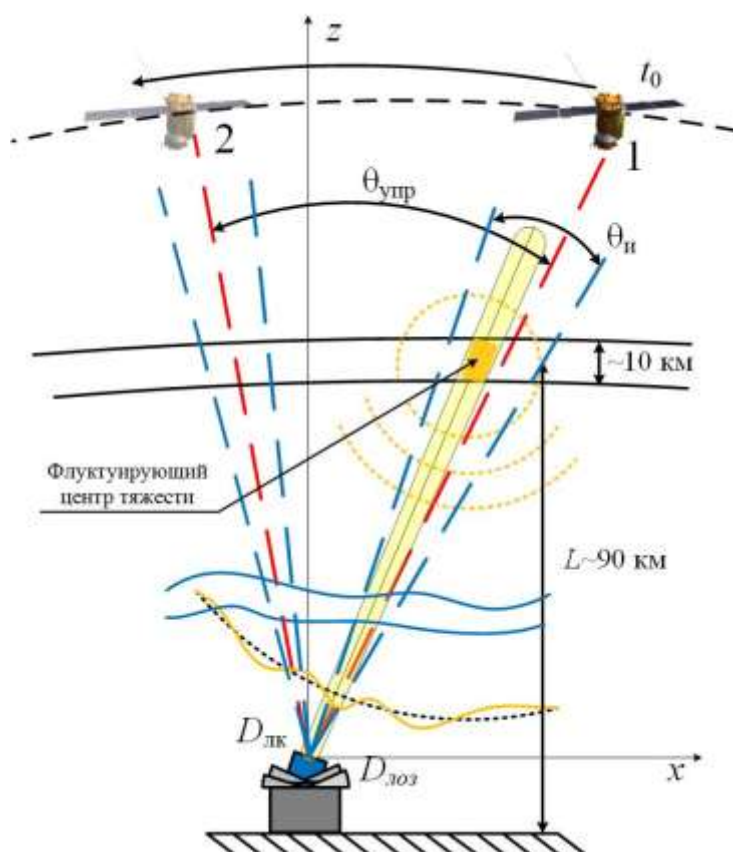


Рис. 1. Общая схема работы наземного комплекса с ЛОЗ:

1 – видимое положение КА в момент времени t_0 при его регистрации фотоприемным устройством; 2 – прогнозируемое положение КА с учетом времени обработки отраженного от КА сигнала, времени распространения до ЛОЗ и обратно, времени обработки и времени распространения лазерного пучка до КА

Для локально однородного и изотропного случайного поля структурная функция флуктуации фазы между точками, находящимися в поперечном сечении луча на расстоянии r для длинных трасс (т.е. для плоской волны), определяется выражением [10]

$$D_{\varphi}(r) = 1,46k^2 r^{5/3} \int_0^L C_n^2(z) dz, \quad (1)$$

где k – волновое число, $k = 2\pi/\lambda$;
 C_n^2 – структурная функция вариаций показателя преломления;
 L – длина трассы.

Выражение (1) можно записать через радиус когерентности r_0 турбулентной атмосферы:

$$D_\varphi(r) = 6,88 \left(\frac{r}{r_0} \right)^{5/3}, \quad (2)$$

где, в свою очередь,

$$r_0 = \left(0,423k^2 \sec \beta_0 \int_0^H C_n^2(h) dh \right)^{-\frac{3}{5}}, \quad (3)$$

Измеренному значению r_0 на длине волны λ_0 и зенитном угле β_0 будет соответствовать значение r'_0 на интересующей длине волны λ и зенитном угле β [9]:

$$r'_0 = r_0 \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^{6/5} \cos^{3/5}(\beta).$$

Принято определять радиус когерентности r_0 из условия, при котором среднеквадратическое отклонение фазы $\sigma_\varphi = (r_0, R) = \pi$. В действительности, если быть точнее, при $r = r_0$, как следует из (2), $\sigma_\varphi = 2,6$ рад, или $0,84\pi$.

Пространственная когерентность лазерного пучка значительно уменьшается на расстоянии в его поперечном сечении, большем r_0 , что приводит за время наблюдения, превышающее «время заморозки атмосферы» (1–10 мсек), к размытию и сцинтилляциям луча, в то время как при условии $r < r_0$ наблюдается только отклонение луча целиком и его дрожание. Первый эффект наблюдается, когда диаметр излучающей апертуры лазера $D > r_0$, а второй – при $D \leq r_0$. Среднеквадратическое отклонение угла наклона луча (по двум осям) определяется по формуле [9]

$$\sigma_n \approx 0,6 \left(\frac{D}{r_0} \right)^{5/6} \left(\frac{\lambda}{D} \right). \quad (4)$$

Из (4) следует, что, во-первых, $\sigma_n \sim 1/D^{1/6}$, т.е. при увеличении диаметра излучающей апертуры лазера отклонение луча уменьшается, но незначительно, а во-вторых, при $D = r_0$

$$\sigma_n \approx 0,6 \left(\frac{\lambda}{r_0} \right).$$

Рассмотрим три характерных случая для излучения с длиной волны $\lambda = 0,589$ мкм. В первом случае лазер находится на поверхности земли, причем диаметр его апертуры равен радиусу когерентности атмосферы, например при $D = r_0 = 5$ см СКО наклона $\sigma_n = 7$ мкрад. Во втором случае лазер по-прежнему находится на поверхности земли, но $D > r_0$, например, $r_0 = 5$ см, $D = 30$ см. Для этого случая $\sigma_n = 5,3$ мкрад. В третьем случае лазер с апертурой размещен в горных условиях на высоте 1–2 км, при которых можно считать $D = r_0 = 30$ см. В этом случае $\sigma_n = 1,2$ мкрад.

В общем случае величина угла изопланатизма θ_n определяется по формуле

$$\theta_n = \left(2,91k^2 (\sec \beta)^{\frac{8}{3}} \int_0^H C_n^2(h) h^{\frac{5}{3}} dh \right)^{-\frac{3}{5}}. \quad (5)$$

Введен параметр, определяющий эффективную толщину турбулентной атмосферы [9]:

$$h = \left(\frac{\int_0^H C_n^2(h) h^{\frac{5}{3}} dh}{\int_0^H C_n^2(h) dh} \right)^{\frac{3}{5}}. \quad (6)$$

Тогда с учетом выражений (3) и (6) выражение для угла изопланатизма θ_n приводится к упрощенному виду:

$$\theta_n = 0,314 \frac{r_0}{h} \cos^{8/5} \beta. \quad (7)$$

Как правило, в качестве средней эффективной толщины атмосферного слоя h для ночных условий наблюдения принимается $h = 1500$ м, а для дневных условий $h = 3000$ м [9]. Следует отметить, что в пределах угла изопланатизма, определяемого выражением (7), СКО искажений волнового фронта не превышает 1 рад [8].

Без нарушения общности дальнейших рассуждений рассмотрим случай формирования ЛОЗ на вертикальной трассе ($\beta = 0$). При справедливости выражений (3)–(7) для того, чтобы дифракционно ограниченный лазерный пучок с угловой расходимостью (по уровню половинной мощности) $\theta_d = 1,22 \lambda/D$ при прохождении через турбулентную атмосферу не вышел за пределы угла изопланатизма с некоторой вероятностью p , равной [11]

$$p = 1 - e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\theta_n - \theta_d}{\sigma_n} \right)^2},$$

должно выполняться следующее условие:

$$\frac{1}{2} (\theta_n - \theta_d) \geq \sigma_n. \quad (8)$$

Вероятность нахождения лазерного пучка в пределах угла θ_n в соответствии с (6) составляет 0,68.

С учетом (4) и (7) получим из выражения (8) для предельного случая $D = r_0$ следующее условие нахождения натриевой ЛОЗ в пределах угла изопланатизма:

$$\frac{1}{2} \left(\frac{0,314}{h} r_0 - 1,22 \frac{\lambda}{r_0} \right) \geq 0,6 \frac{\lambda}{r_0}. \quad (9)$$

Из (9) получим

$$r_0 \geq 2,78 \sqrt{\lambda h}. \quad (10)$$

Для случаев ночных наблюдений ($h = 1500$ м) $r_0 \geq 8,3$ см с вероятностью 0,68 лазерный луч, формирующий натриевую ЛОЗ, будет находиться в пределах угла изопланатизма, обеспечивая одно из условий эффективной компенсации фазовых искажений атмосферы. Для дневных наблюдений ($h = 3000$ м) должно выполняться условие $r_0 \geq 11,7$ см.

Для выполнения условия нахождения лазерного пучка в пределах угла θ_n с вероятностью 0,95 в правой части неравенства (6) должна присутствовать величина $2 \sigma_n$. Для этого случая должно выполняться условие

$$r_0 \geq 3,93 \sqrt{\lambda h}. \quad (11)$$

Для условия (11) при ночных наблюдениях ($h = 1500$ м) $r_0 \geq 11,7$ см, для дневных условий ($h = 3000$ м) значение $r_0 \geq 16,5$ см. Отметим, что полученные значения из условий (10) и (11) приведены для случая формирования ЛОЗ в зенит, однако легко перейти к анализу произвольного зенитного угла формирования, используя угловую зависимость в выражении (7).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрен режим формирования ЛОЗ в наземных оптико-лазерных системах как опорного источника для коррекции атмосферных фазовых искажений, когда диаметр излучающей апертуры не превышает радиуса пространственной когерентности r_0 . Это позволяет сохранить пространственную когерентность зондирующего пучка при его дрожании в пределах угла изопланатизма и исключить тем самым абберации волнового фронта более высокого порядка.

В результате проведенных исследований по определению ограничений применения натриевой ЛОЗ получены аналитические выражения (10) и (11), определяющие граничные значения радиуса пространственной когерентности турбулентной атмосферы r_0 , при которых лазерный пучок при его дрожании не выходит за пределы угла изопланатизма турбулентной атмосферы. Это позволяет формировать предварительные рекомендации по местам размещения наземных оптико-лазерных средств, использующих алгоритмы компенсации амплитудно-фазовых атмосферных искажений изображений КА.

Следует отметить, что данный подход в полной мере справедлив и для наземных лазерных локационных средств получения координатной и некоординатной информации о космических объектах естественного и искусственного происхождения.

Список используемых источников

1. Клейменов В.В., Новикова Е.В. Действующие крупногабаритные наземные оптические телескопы наблюдения за космическими объектами // Известия вузов. Приборостроение. – 2018. – Т. 61, № 10. – С. 827–843.
2. Большасова Л.А., Лукин В.П. Адаптивная коррекция атмосферных искажений оптических изображений на основе искусственного опорного источника. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 218 с.
3. Бакут П.А., Ершова О.М., Шумилов Ю.П. Расчет энергетика искусственной лазерной звезды // Квантовая электроника. – 1996. – Т. 23, № 12. – С. 1100–1104.
4. Лукин В.П. Проблемы формирования лазерных опорных звезд // Оптика атмосферы и океана. – 1998. – Т. 11, № 5. – С. 460–472.
5. Емалеев О.Н., Лукин В.П. Коррекция угловых смещений оптических пучков // Квант. электрон. – 1982. – Т. 9, № 11. – С. 2264–2271.
6. Когерентность лазерного излучения в атмосфере / М.С. Беленький, В.П. Лукин, В.Л. Миронов и др. – Новосибирск: Наука, 1985. – 176 с.
7. Банах В.А., Миронов В.Л. Локационное распространение лазерного излучения в турбулентной атмосфере. – Новосибирск: Наука, 1986.
8. Пратт В.К. Лазерные системы связи: пер. с англ. / под ред. А.Г. Шереметьева. – М.: Связь, 1976. – 232 с.
9. Hardy J.W. Adaptive Optics for Astronomical Telescopes. – Oxford University press, 1998. – 437 p.
10. Лукин В.П. Атмосферная адаптивная оптика / под ред. С.Д. Творогова. – Новосибирск: Наука, 1986. – 286 с.
11. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – 4-е изд., перераб. – М.: Наука, 1969. – 576 с.

И.В. Ворошилов,
кандидат физико-математических наук;
А.В. Казимиров,
кандидат техн. наук;
Ю.И. Молодова,
кандидат техн. наук, доцент;
А.В. Молостов;
А.И. Прилуцкий,
доктор техн. наук, доцент;
И.К. Прилуцкий,
доктор техн. наук, профессор

АНАЛИЗ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ И ОЦЕНКА УРОВНЯ МЕХАНИЧЕСКОГО КПД ПОРШНЕВЫХ КОМПРЕССОРОВ С ЛИНЕЙНЫМ ПРИВОДОМ ДЛЯ СИСТЕМ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ И ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ВООРУЖЕНИЯ

Приведены результаты исследования рабочих процессов и параметров 2-ступенчатых поршневых компрессоров среднего давления с линейным приводом, работающих на чистых газах, газовых и парожидкостных смесях произвольного состава при положительной и отрицательной температуре рабочей среды на входе в компрессор. Аналогами таких компрессоров являются агрегаты ЭГК-15/1-75С в 4-ступенчатом исполнении, предложенные НТК «Криогенная техника» и применяемые в составе систем жизнеобеспечения личного состава на борту подводных лодок.

Основное внимание в работе уделено прогнозу технико-экономических показателей существующих и проектируемых газовых компрессоров. Научное решение поставленной задачи базируется на применении авторской программы «КОМДЕТ» с подпрограммой «СВОЙСТВА РАБОЧИХ ВЕЩЕСТВ», в основе которых лежит математическое описание свойств реальных газов, газовых, газожидкостных и паровоздушных смесей и протекающих физических процессов на базе фундаментальных уравнений термодинамики тела переменной массы, теплообмена и массопереноса, механики и газовой динамики в сочетании с комплексом эмпирических коэффициентов и зависимостей, полученных при испытании конструктивно разнообразных имитирующих устройств, лабораторных и натуральных образцов поршневых машин, различных по назначению, геометрическим размерам цилиндров, режимным параметрам, условиям охлаждения и смазки.

Ключевые слова: компрессор, газы и газовые смеси, линейный привод, рабочие процессы, механическое трение, динамика пластин клапанов, теплообмен и массоперенос, численный анализ, оптимизация, прогноз технико-экономических показателей.

ВВЕДЕНИЕ

Роль сжатых газов, применяемых в военной технике, трудно переоценить. Большое число и разнообразие выполняемых с помощью сжатых газов технологических операций, их продолжительность и другие специфические особенности (род применяемого газа, необходимые давления и расходы, удаление от потребителей и т.д.) существенно влияют на выбор оборудования систем газоснабжения. Основным элементом таких систем является источник сжатых газов – компрессор.

Исходя из нужд и задач, выполняемых пневматическими системами в объектах вооружения и военной технике, основой парка компрессорных машин стали машины объемного действия – поршневые компрессоры (ПК).

Сам по себе поршневой компрессор (ПК) – это высокотехнологичное устройство. Многоступенчатые агрегаты имеют сложную систему механизма привода движения дифференциальных поршней, которая ввиду высоких нагрузок, вызванных необходимостью обеспечения выходного давления в размере 40 МПа, подвержена интенсивному износу. Примером такого

агрегата может служить компрессор 502ВП4/400, входящий в состав системы газоснабжения 8Г323, широко применяемой на стартовых и технических комплексах космических войск. Одним из недостатков такого компрессора является значительная шумность и высокие вибрационные нагрузки, производимые им при работе. Также компрессор 502ВП4/400 обладает большими массогабаритными характеристиками при средних значениях вырабатываемого максимального давления и производительности.

Кроме того, в случае выхода из строя механизма движения любой поршневой компрессор становится полностью непригодным для дальнейшего применения, а его ремонт связан с высокими временными и финансовыми затратами. Это в конечном итоге может привести к срыву выполнения боевой задачи.

Для решения описанной ситуации предлагается произвести архитектурную декомпозицию многоступенчатого поршневого компрессора на отдельные модули, оснащенные отдельным приводом, реализующим линейное перемещение тронкового поршня – линейным приводом. В этом случае выход из строя отдельного привода не приведет к поломке компрессорного агрегата в целом. Ремонт такого компрессора сведется к замене конкретного модуля. Отсутствие вращательного движения кривошипно-шатунного механизма сведет к минимуму вибрационные и шумовые нагрузки.

Отличительной особенностью ПК с линейным приводом являются повышенный ход поршня S_p , низкая частота рабочих циклов n при предельно малой средней скорости поршня $c_p = 2S_p \cdot n$. Такое сочетание кинематических и режимных параметров гарантирует увеличение удельной теплообменной поверхности цилиндра и повышение интенсивности отвода теплоты от газа к охлаждающей среде, а также снижение газодинамических потерь в органах газораспределения и износа уплотнительных элементов поршней и штоков, а следовательно, и рост эффективности работы компрессора в целом.

С другой стороны, существуют и негативные последствия такого подхода, обусловленные увеличением продолжительности времени цикла $\tau_c \sim n^{-1}$ и, как следствие, ростом внешних утечек через уплотнения поршня и штока и внутренних перетечек через закрытые всасывающие и нагнетательные клапаны.

Дифференцированная оценка влияния каждого из указанных факторов на одновременно протекающие и зависящие друг от друга рабочие процессы экспериментальным путем практически невозможна. Поэтому в настоящее время на стадии поверочного расчета и рабочего проектирования параллельно проводится численный анализ различных вариантов конструктивного исполнения машин и протекающих рабочих процессов, позволяющий при минимальных материальных и временных затратах научно обосновать вариант, близкий к «оптимальному».

Для проведения анализа параметров рабочих процессов использовалась программа расчета «КОМДЕТ» [1]. Основой этой программы является математическое моделирование рабочих процессов в компрессорных и расширительных машинах объемного действия. Адекватность полученных результатов подтверждается всесторонней апробацией этой программы на ряде отечественных предприятий и организаций.

В качестве объекта исследования был выбран экспериментальный газовый компрессор ЭГК-15/1-75С среднего давления в 2-ступенчатом исполнении с повышенным отношением давлений в ступенях [2]. Тактико-технические характеристики этого компрессора представлены в табл. 1. Он используется в системах жизнеобеспечения личного состава на борту подводных лодок при получении кислорода электрохимическим путем, предусматривающим сжатие и закачку в баллоны побочных продуктов процесса электролиза морской воды – водородсодержащих смесей [3, 4]. В качестве независимой переменной при выполнении численного анализа выбрана величина $\lambda_{ш}$, определяемая из следующего выражения:

$$\lambda_{ш} = \frac{r}{L_{ш}}, \quad (1)$$

где r – радиус кривошипа;
 $L_{ш}$ – длина шатуна.

Изменения значений величины $\lambda_{ш}$ производились в диапазоне $\lambda_{ш}=0,25\div 0,01$. Здесь $\lambda_{ш}=0,25$ соответствует компрессорам с традиционным кривошипно-шатунным механизмом движения, а $\lambda_{ш}\rightarrow 0$ – компрессорам с аксиальным или линейным приводом, у которых нормальные к зеркалу цилиндра газовые силы $H\rightarrow 0$ (рис. 1).

Таблица 1

**Тактико-технические характеристики 3-рядного 2-ступенчатого
газового компрессора ЭГК-15/1-75С с линейным приводом**

Параметр	Размерность	Номер ступени сжатия	
		I	II
База	–	3Ш1,6	
Шифр ступеней		3Ш130-110-200-А...Е	3Ш-45-110-200-А...Е
$D_{ц}$	мм	2·130	1·45
$S_{п}$		110	
n	ЦИКЛОВ/МИН	200	
$c_{п}$	м/с	0,733	
$p_{вс} \rightarrow p_{нг}$	МПа	0,1→1,31	1,3→7,5
$\Pi_{ст} = p_{нг} / p_{вс}$	–	13,1	5,77
a		0,04	0,085
$T_{вс}$	К	293	298
$T_{ст.ц}$		313	313
$Z_{п.кан}/Z_{п.кол}$	–	4/2	
$\delta_{усл.пк} = \delta_{закр.кл}$	МКМ	0,5	
Рабочее вещество – водород, содержащий газ ВСГ-1			
R	Дж/(кг·К)	1895,97	
k	–	1,39354	
$\rho_{вс.} = f(p_{вс} - T_{вс})$	кг/м ³	0,17995=f(0,1-293)	2,28967=f(1,3-298)

Анализируя сведения, приведенные в табл. 1, отметим следующее.

1. Задание повышенного отношения давлений в I ступени компрессора ($\Pi_{ст.1}=13,1$) позволяет практически вдвое сократить число ступеней сжатия, что, в свою очередь, способствует улучшению удельных массогабаритных показателей компрессора.

2. При равенстве показателей адиабаты $k=1,4$ плотность сжимаемой газовой смеси (ВСГ-1) в 6,6 раза ниже, чем у воздуха, что при прочих равных условиях приводит к росту интенсивности отвода теплоты в элементах ступени компрессора. Отсюда следует, что при высоких отношениях давлений $\Pi_{ст}$ и низких частотах протекающих процессов ($20 \leq n \leq 300$ циклов/мин) температуры газа в стандартных точках нагнетания ступеней $T_{стн}$ могут не превышать допустимых значений.

Состав ВСГ-1 следующий:

- щелочи (KOH, K₂CO₃, KHCO₃) – до 1 мг/м³;
- пары метанола – до 0,5 %;
- оксид углерода – до 7,0 %;
- кислород – до 2,4 %;
- водород (H₂) – оставшееся количество.

Таким образом, газовая постоянная этой смеси газов $R=1895,97$ Дж/(кгК); показатель адиабаты $k=1,393538$; плотность при стандартных условиях $\rho_{с.у}=0,182285$ кг/м³; плотность в полости всасывания $\rho_{вс.1}=0,17995$ кг/м³.

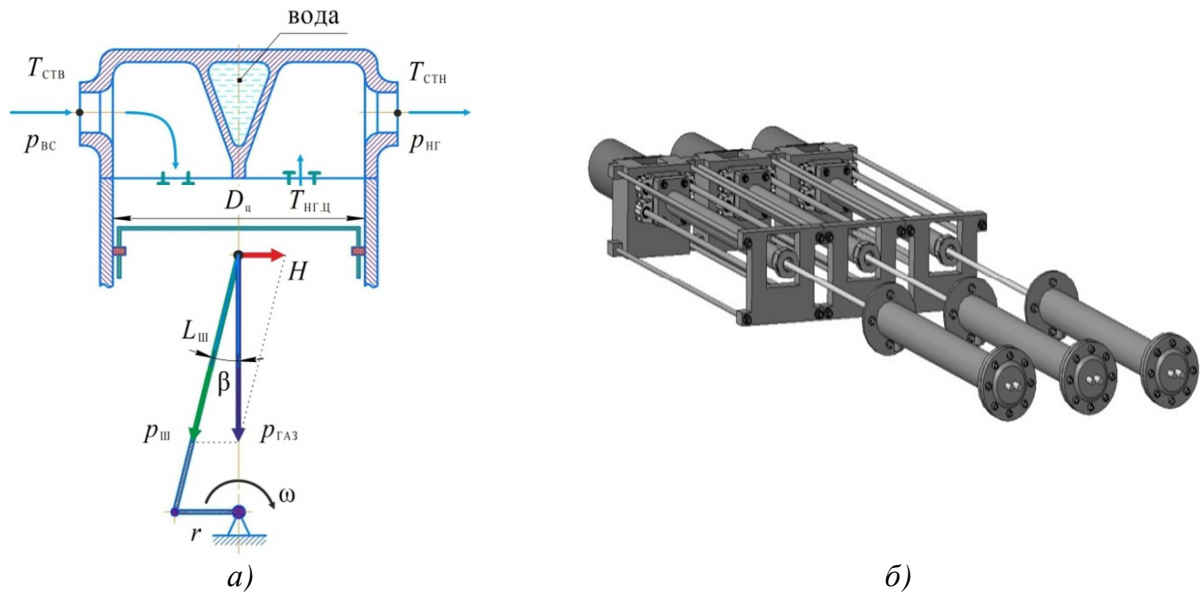


Рис. 1. Схемы компрессоров:

а – с кривошипно-шатунным приводом, $\lambda_{ш}=0,25$; б – с линейным приводом $\lambda_{ш}=0,01$

При вводе сведений о ВСГ-1 в программу расчета «КОМДЕТ» был принят следующий состав в объемных долях: $H_2 - 91,3\%$; $CO - 6,0\%$; $O_2 - 2,3\%$; $CH_4O - 0,4\%$.

Указанные факторы влияют на рабочие процессы в цилиндре и в примыкающих полостях всасывания и нагнетания конечного объема, отражаются на динамике пластин органов газораспределения, интенсивности внешних утечек и внутренних перетечек газа через существующие зазоры, на температурах нагнетаемого газа и удельных затратах на преодоление механического трения. Поэтому на стадии разработки компрессоров нового типа проведение поверочного расчета ступеней сжатия на базе апробированных математических моделей (ММ) и созданных на их основе прикладных программ расчета становится общепринятой нормой [5, 6, 7, 8, 9].

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Математическая модель ступени компрессора в трактовке авторов представляет собой систему, построенную на базе фундаментальных теоретических положений термодинамики тела переменной массы и дополненную рядом логических условий, эмпирических зависимостей и специфических коэффициентов. Она адекватно заменяет объект исследования, обеспечивая при этом изучение, поиск и научное обоснование перспективных технических решений на базе комплексной выходной информации в цифровой и графической форме (рис. 3), раскрывающей взаимосвязь конструкции объекта исследования с протекающими рабочими процессами [9, 10]. В основе ММ лежат уравнения сохранения энергии тела переменной массы в цилиндре i -й ступени и в j -х примыкающих к нему через органы газораспределения полостях конечного объема:

$$d(U_i m_i) = dQ_i - dL_i + \sum_{j=1}^n dE_{j,i}, \quad (2)$$

где $d(U_i m_i)$ – бесконечно малое изменение энергии газа и его массы при сжатии;
 Q_i – количество тепловой энергии, выделяемое при сжатии газа;
 L_i – работа, затрачиваемая на сжатие газа;
 $E_{j,i}$ – энергия, затрачиваемая на перемещение газа в цилиндре и в полостях газораспределения.

Базируясь на законах термодинамики тела переменной массы [8, 9, 10, 11], запишем уравнение для удельной внутренней энергии реального газа в цилиндре ступени компрессора (детандера) с параметрами p и T :

$$du = T \cdot ds - p \cdot dv, \quad (3)$$

которое после несложных преобразований позволяет связать изменение удельной энтропии s с протекающими процессами теплообмена и массопереноса:

$$ds = \frac{dQ}{m \cdot T} + \frac{\sum[(h_j - h) \cdot dm_{j-II}]}{m \cdot T}. \quad (4)$$

Изменение массы газа в рабочей полости за время, соответствующее повороту вала на угол $\Delta\varphi$, определяется соотношением

$$\Delta m = \frac{\Delta\varphi}{\omega} \sum_1^Z M^*, \quad (5)$$

где M^* – функция, определяющая массовый расход газа через органы газораспределения и уплотнительные узлы;

Z – число каналов (щелей).

Для расчета величины M^* используются формулы адиабатного течения [13]:

– при критическом режиме истечения формула имеет вид

$$M^* = (\mu F)_\varphi \sqrt{k \cdot p_{\text{ВХ}} \cdot \rho_{\text{ВХ}} \cdot \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}, \quad (6)$$

– в случае докритического истечения формулу можно записать в виде

$$M^* = (\mu F)_\varphi \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k-1} \cdot p_{\text{ВХ}} \cdot \rho_{\text{ВХ}} \cdot \left[\left(\frac{p_{\text{ВЫХ}}}{p_{\text{ВХ}}}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_{\text{ВЫХ}}}{p_{\text{ВХ}}}\right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}. \quad (7)$$

Здесь индексы «вх» и «вых» – параметры газа на входе и выходе рассматриваемой щели $F_{\text{Щ}}$, а текущий коэффициент расхода μ вычисляется с помощью эмпирической зависимости, предложенной авторами в работах [9, 10]:

$$\mu = \mu_{\text{Щ}} = 1 - 0,55 \cdot \left(\frac{f_{\text{Щ}\varphi}}{f_c}\right)^{0,58}. \quad (8)$$

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА

Для определения количества теплоты $\Delta Q_{\Delta\varphi}$, отводимой от газа при повороте вала на угол $\Delta\varphi$, воспользуемся уравнением, описывающим конвективный теплообмен газа со стенками рабочей камеры, температура которой практически постоянна во времени:

$$dQ = \alpha_{F,\varphi} \cdot F_\varphi \cdot (T_{\text{СТ}} - T) \cdot d\tau, \quad (9)$$

где $\alpha_{F,\varphi}$ – текущий коэффициент теплоотдачи, осредненный по поверхности цилиндра F ;

F_φ – переменная во времени поверхность теплообмена рабочей камеры;

$T_{\text{СТ}}$ – осредненная по поверхности теплообмена рабочей камеры температура стенок;

T – текущая температура газа в рабочей камере;

τ – время.

Осредненная температура стенок рассчитывается следующим образом:

$$t_{\text{СТ}} = k_{\text{СТ}} \cdot (t_{\text{Н}} - t_{\text{К}}) [^\circ\text{C}], \quad (10)$$

где $k_{ст}$ – эмпирический коэффициент, характеризующий способ охлаждения ступени, $k_{ст} = 0,3 \div 0,5$, цифры указывают на «водяное» или «воздушное» охлаждение соответственно.

В конечно-разностной форме исходное уравнение для определения количества теплоты $\Delta Q_{\Delta\varphi}$ будет иметь вид

$$\Delta Q_{\Delta\varphi} = \frac{\Delta\varphi}{\omega} \cdot [\alpha_{F\varphi} \cdot F_{\varphi} \cdot (T_{ст} - T)]. \quad (11)$$

В уравнении (11) текущая поверхность теплообмена описывается с помощью уравнения

$$F_{\varphi} = 2F_{п} + \pi \cdot [(S_{м.л} + S_{\varphi}) \cdot D], \quad (12)$$

где $S_{м.л}$ – площадь линейного мертвого пространства ступени;
 S_{φ} – площадь поверхности цилиндра, ометаемая поршнем;
 D – диаметр цилиндра ступени;
 $F_{п}$ – площадь рабочей поверхности поршня.

Текущий коэффициент теплоотдачи $\alpha_{F\varphi}$ определяется как

$$\alpha_{F\varphi} = \frac{Nu \cdot \lambda}{D_{\text{ЭКВ}}}, \quad (13)$$

где Nu – критерий Нуссельта;
 λ – коэффициент теплопроводности сжимаемого газа;
 $D_{\text{ЭКВ}}$ – эквивалентный линейный размер (диаметр цилиндра ступени).

Определить Nu можно из критериального уравнения, предложенного профессором И.К. Прилуцким для компрессорных ступеней:

$$Nu = A_{пк} \cdot Re^x = \sqrt{\frac{\rho_{вс.I}}{\rho_{вс.i}}} \cdot Re^{0,6}, \quad (14)$$

где Re – критерий Рейнольдса;
 $\rho_{вс.I}$ – плотность газа на входе в I ступень;
 $\rho_{вс.i}$ – плотность газа на входе в i-ю ступень;
 x – эмпирический показатель степени, $x = 0,6$.

Указанные плотности $\rho_{вс.I}$ и $\rho_{вс.i}$ и показатель степени $x = 0,6$ получены в ходе комплексного расчетно-теоретического и экспериментального исследования, результаты которого приведены в работах [9, 14].

Критерий Рейнольдса определяется по формуле

$$Re = \frac{w \cdot D_{\text{ЭКВ}} \cdot \rho}{\mu}, \quad (15)$$

где w – характеристическая скорость газа в полости сжатия;
 ρ – плотность газа в полости сжатия;
 μ – коэффициент динамической вязкости газа.

Решая уравнения относительно $\alpha_{F\varphi}$, после ряда упрощений находим текущее во времени и осредненное по текущей поверхности теплообмена значение коэффициента теплоотдачи в цилиндре машин с возвратно-поступательным движением поршня:

$$\alpha_{\varphi} = \left[\frac{\lambda}{D_{\text{ЭКВ}}} A_{пк} \cdot \left(\frac{w \cdot D_{\text{ЭКВ}} \cdot \rho}{\mu} \right)^{0,6} \right]. \quad (16)$$

Здесь плотность ρ , теплопроводность λ и динамическая вязкость μ газа определяются в процессе итерационного расчета цикла компрессорной ступени.

Таким образом, текущее количество теплоты $\Delta Q_{\Delta\varphi}$, отводимое от газа к стенкам рабочей камеры в течение рабочего цикла, определяется с помощью уравнения

$$\Delta Q_{\Delta\varphi} = \frac{\Delta\varphi}{\omega} \cdot \left[\frac{\lambda}{D_{\text{ЭКВ}}} A_{пк} \cdot \left(\frac{w \cdot D_{\text{ЭКВ}} \cdot \rho}{\mu} \right)^{0,6} \right] F_{\varphi} \cdot (T_{ст} - T).$$

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ МЕХАНИЧЕСКОГО ТРЕНИЯ

Механическое трение в поршневых компрессорах и детандерах возникает в элементах, совершающих возвратно-поступательное (S) и вращательное (ω) движение. Ниже приводится упрощенная модель процессов механического трения, которая позволяет при минимальных затратах машинного времени обеспечить достоверность получаемых интегральных показателей.

Суммарную мощность трения можно представить в следующем виде:

$$N_{\text{тр}} = N_{\text{тр},S} + N_{\text{тр},\omega}, \quad (17)$$

Преобразуя данное уравнение, получим:

$$N_{\text{тр}} = N_{\text{тр},S} \left(1 + \frac{N_{\text{тр},\omega}}{N_{\text{тр},S}} \right) = K_S \cdot N_{\text{тр},S}, \quad (18)$$

где K_S – коэффициент, учитывающий соотношение мощности трения возвратно-поступательного и вращательного движения.

Согласно рекомендациям, приведенным в литературе [15, 16], величина $K_S = 1,43 \div 1,67$, большие значения которой соответствуют высокооборотным компрессорам.

Затраты мощности на преодоление трения при возвратно-поступательном движении в общем случае определяются уравнением

$$N_{\text{тр},S} = \sum_{j=1}^{n_j} [N_{\text{тр},K} + N_{\text{тр},П} + N_{\text{тр},C} + \sum_{i=1}^{n_i} (N_{\text{тр},Y} + N_{\text{тр},M})], \quad (19)$$

где n_j, j – число рядов и номер ряда;

n_i, i – число ступеней сжатия в j -м ряду компрессора и порядковый номер ступени.

Индексы «К», «П», «С», «У», «М» соответствуют основным элементам узлов трения – крейцкопф, поршень, сальник, уплотнительные и маслосъемные кольца. В зависимости от конструктивной схемы объекта исследования отдельные составляющие полученного уравнения могут быть равны нулю.

По физической сути мощность трения при бесконечно малом перемещении рассматриваемого элемента можно представить в виде выражения

$$dN_{\text{тр}} = \frac{\omega}{2\pi} \cdot F_{\text{тр}} \cdot dS. \quad (20)$$

Для кривошипно-шатунного механизма изменение хода поршня по углу поворота вала выражается следующей зависимостью:

$$S_{\varphi} = r \cdot \left(1 + \frac{\lambda_{\text{ш}}}{4} - \cos\varphi - \frac{\lambda_{\text{ш}}}{4} \cdot \cos 2\varphi \right), \quad (21)$$

элементарное перемещение в конечно-разностной форме имеет вид

$$dS = \Delta S = S_{\varphi+\Delta\varphi} - S_{\varphi}, \quad (22)$$

а сила трения определяется на основании уравнения

$$F_{\text{тр}} = K_{\text{тр}} \cdot |H|, \quad (23)$$

где $K_{\text{тр}}$ – коэффициент трения;

$|H|$ – абсолютная величина силы, действующей по нормали к поверхности трения в рассматриваемом узле.

Величины $K_{\text{тр}}$ и $|H|$ являются функциями угла поворота коленчатого вала и зависят от ряда геометрических параметров элементов трения, режима работы компрессора, материала пар трения, условий охлаждения, смазки и т.д.

Конкретизируем полученные выше выражения.

ПАРА ТРЕНИЯ «ПОРШЕНЬ – ЦИЛИНДР»

Для машин с тронковым поршнем имеем:

$$|H| = (P_{\phi} + I_{\phi}) \cdot \lambda_{ш} \cdot \sin\varphi, \quad (24)$$

где P_{ϕ} – текущая газовая сила;

I_{ϕ} – текущая инерционная сила.

Величина коэффициента трения зависит от длины опорной поверхности поршня $L_{п}$, динамической вязкости масла в зоне трения $\mu_{м}$, средней скорости поршня $C_{п}$ и конструктивного соотношения $L_{п}/D$ и определяется согласно рекомендациям [17] по формуле

$$K_{тр.п} = 3 \cdot \sqrt{\frac{\mu_{м} \cdot C_{п} \cdot L_{п}}{|H|}}, \quad (25)$$

Тогда силу трения находим на основании выражения

$$F_{тр} = 3 \cdot \sqrt{\mu_{м} \cdot C_{п} \cdot L_{п} \cdot |H|}, \quad (26)$$

Вязкость масла $\mu_{м}$ определяется в функции от его температуры в зоне трения.

Для крейцкопфных машин трением в паре «поршень – цилиндр» можно пренебречь; сила трения в паре «крейцкопф – направляющие» определяется по приведенным выше зависимостям.

ПАРА ТРЕНИЯ «ПОРШНЕВЫЕ КОЛЬЦА – ЦИЛИНДР»

В зависимости от конструкции уплотнительного узла поршня в его составе могут быть уплотнительные и маслосъемные кольца. Принимая величину коэффициента трения одинаковой для обоих типов колец, получим:

$$F_{тр.у} = 2,15 \cdot \sqrt{\pi D \mu_{м} C_{п}} \cdot z_{у} \cdot \sqrt{H_{у}^2}, \quad (27)$$

$$F_{тр.м} = 2,15 \cdot \sqrt{\pi D \mu_{м} C_{п}} \cdot z_{м} \cdot \sqrt{H_{м}^2}, \quad (28)$$

где $H_{у}$ – нормальные к зеркалу цилиндра усилия от газовых сил;

$H_{м}$ – нормальные к зеркалу цилиндра усилия от упругих сил;

z – число колец.

Приведенные в уравнениях (27) и (28) усилия определяются следующим выражением:

$$H_{у} = 0,142 \cdot S_1^* \cdot E \cdot \left(\frac{t_{у}}{D - t_{м}}\right)^2 \cdot \pi b_{м}, \quad (29)$$

где E – модуль упругости материала колец;

S_1^* – зазор в замке в свободном состоянии;

t, b – размеры поперечного сечения кольца;

p_{ϕ} – переменное давление в рассматриваемой полости;

$p_{к}$ – давление в картере.

ПАРА ТРЕНИЯ «ШТОК – САЛЬНИК»

Силу трения в данном узле находим в следующем виде:

$$F_{тр.с} = K_{тр.с} \cdot (H_{с.у} + H_{с.р}), \quad (30)$$

где $H_{с.у}$ и $H_{с.р}$ – комплексы, учитывающие воздействие элементов сальника на шток за счет упругости браслетной пружины ($у$) и газовых сил ($р$).

Они равны:

$$H_{c,y} = 4\pi \cdot C_{пр} \cdot \Delta l, \quad (31)$$

$$H_{c,p} = \frac{|p_{\varphi} - p_{к}|}{z_c} \cdot \pi d_{шт} \cdot b_c \quad (32)$$

где $C_{пр}$ – жесткость браслетной пружины;
 Δl – натяг браслетной пружины;
 z_c – число парных элементов в уплотнительном узле;
 $d_{шт}$ – диаметр штока;
 b – осевая длина уплотнительных элементов сальника.

Коэффициент трения задается в пределах $K_{тр,c} = 0,15 \div 0,3$, здесь большие значения соответствуют ступеням без смазки.

Следует отметить, что приведенные уравнения не учитывают дополнительные затраты мощности на привод вспомогательных устройств (вентиляторы, масляные насосы) от вала компрессора. На их основе определяется мощность трения элементов движущихся возвратно-поступательно $N_{тр,S}$ и суммарная мощность трения $N_{тр} = K_S \cdot N_{тр,S}$, что при найденной в ходе численного эксперимента индикаторной мощности дает возможность получить величину механического КПД каждой из ступеней $\eta_{мех,i}$ и компрессора $\eta_{мех,к}$ в виде:

$$\eta_{мех,i} = \frac{N_{инд}}{N_{инд} + N_{тр}}, \quad \eta_{мех,к} = \frac{\sum N_{инд}}{\sum N_{инд} + \sum (N_{тр,S} + \sum N_{тр,\omega})}, \quad (33)$$

$$\eta_{из,к} = \frac{N_{из,к}}{N_{в,к}}. \quad (34)$$

КОЭФФИЦИЕНТ ПОДАЧИ

Объективность результатов численного анализа работы поршневых компрессоров в значительной мере зависит от корректности принятого на этом этапе уравнения для коэффициента подачи $\lambda = V_{вс}/V_T$ и его компонентов. В настоящей работе используется теоретически

обоснованное и экспериментально проверенное выражение для λ [9,10], приведенное ниже и раскрывающее сущность и взаимосвязь основных процессов, протекающих в рабочей камере ступени компрессора:

$$\lambda = \frac{V_{вс}}{V_T} = \lambda_d \cdot \lambda_T \cdot [\lambda_o - (\Delta\lambda_{o,вс} + \Delta\lambda_{o,нг})] - (v_{в,у} + v_{пр}), \quad (35)$$

где λ_d – коэффициент давления;
 λ_T – коэффициент подогрева;
 λ_o – объемный коэффициент;
 $(\Delta\lambda_{o,вс} + \Delta\lambda_{o,нг})$ – величина относительных объемных потерь, зависящая от углов запаздывания закрытия всасывающих и нагнетательных клапанов относительно верхней (индекс 3) и нижней (индекс 1) мертвых точек;
 $v_{в,у}$ – относительная величина внешних утечек;
 $v_{пр}$ – относительная величина внешних протечек газа через закрытые клапаны ступеней компрессора.

Коэффициент давления вычисляется из выражения

$$\lambda_d = \frac{p_1}{p_{вс}}, \quad (36)$$

где p_1 – давление газа, когда поршень находится в нижней мертвой точке;

$p_{вс}$ – давление газа при его всасывании в компрессор.

Коэффициент подогрева рассчитывается как

$$\lambda_T = \frac{T_{BC}}{T_1}, \quad (37)$$

где T_{BC} – температура газа при всасывании его в компрессор;

T_1 – температура газа, когда поршень находится в нижней мертвой точке.

Объемный коэффициент определяется по формуле

$$\lambda_o = 1 - a \cdot \left(\frac{\rho_3}{\rho_1} - 1 \right), \quad (38)$$

где a – относительное мертвое пространство в цилиндре;

ρ_3 – температура газа при всасывании его в компрессор;

ρ_1 – температура газа, когда поршень находится в нижней мертвой точке.

Относительная величина внешних утечек газа выражается так:

$$v_{в.у} = \frac{\Delta m_{в.у}}{m/\lambda}, \quad (39)$$

где $\Delta m_{в.у}$ – абсолютная величина изменения массы газа вследствие внешних утечек;

m – масса газа, попавшего в цилиндр.

Комплекс компонентов коэффициента подачи позволяет вычислить величину относительных протечек газа через закрытые клапаны ступеней компрессора $v_{пр}$:

$$v_{пр} = \lambda_d \cdot \lambda_T \cdot [\lambda_o - (\Delta\lambda_{о.вс} + \Delta\lambda_{о.нг})] - (\lambda + v_{в.у}). \quad (40)$$

При подготовке и в ходе численного эксперимента требуется предварительная оптимизация конструкции всасывающих и нагнетательных клапанов, суть которой сводится к устранению явления «флаттера», минимизации скоростей соударения подвижных органов с седлом ($W_c \rightarrow \min$) и ограничителем, снижению газодинамических потерь ($\delta_{(вс+нг)} \rightarrow \min$ и $\lambda_d \rightarrow 1$), а также углов запаздывания или наоборот – преждевременного закрытия клапанов ($\Delta\lambda_{о.(вс+нг)} \rightarrow 0$).

ПРОВЕДЕНИЕ ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Основной задачей в ходе численного эксперимента являлось изучение расчетным путем особенности рабочих процессов поршневых компрессоров с повышенным отношением давлений в ступенях $P_{ст} = \frac{P_{нг}}{P_{вс}}$ и сравнительная оценка уровня механического КПД компрессоров с традиционным кривошипно-шатунным механизмом движения (КШМД) и с линейным приводом.

Для рассматриваемого компрессора ЭГК-15-1-75С с тактико-техническими характеристиками, приведенными в табл. 1, удалось снизить диаметры цилиндров I и II ступеней до $D_I = 2 \cdot 130$ мм и $D_{II} = 1 \cdot 45$ мм, применить на всех рядах унифицированный линейный привод с осевым усилием $P_{б.мин} = 1,6$ т. Таким образом, получили параметры газового тракта, представленные на рис. 2,б. Для сравнения на рис. 2,а представлены параметры газового тракта этого компрессора в стандартном исполнении (с кривошипно-шатунным механизмом движения).

По окончании численного эксперимента на печать выводится графическая и цифровая информация [5, 7, 8, 12, 18, 19] о текущих и интегральных параметрах ступеней в функции от наперед заданной исследователем независимой переменной, в качестве которой могут выступать геометрические и режимные параметры ступеней и элементов газового тракта, свойства сжимаемой среды, типы и специфика органов газораспределения, величины зазоров, условия охлаждения и смазки, свойства материалов в рассматриваемых парах трения и т.д. Объем требуемой выходной информации зависит от сложности решаемой задачи и определяется в ходе подготовки к проведению численного эксперимента. Структура выходных дан-

ных по результатам численного эксперимента, проведенного с помощью программы «КОМ-ДЕТ», представлена на рис. 3.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Анализ результатов численного эксперимента обычно начинают с рассмотрения текущих процессов и интегральных параметров последней Z-й ступени сжатия. В качестве исходного принимается номинальный режим работы ступени с учетом реальных свойств сжимаемой среды, типа и особенностей конструкции органов газораспределения, геометрических параметров цилиндра и примыкающих полостей, размеров элементов газовых трактов.

На этой стадии выполняется следующее:

1. Проверяется соответствие газовых сил $P_{\text{газ}}$ по рядам компрессора осевому усилию выбранного линейного привода. Согласно данным табл. 1 их величины равны:

– ряд I ступени:

$$P_{\text{газ}} = \frac{\pi \cdot D_I^2}{4} \cdot (p_{\text{нрг}} - p_{\text{атм}}) = \frac{\pi \cdot 13^2}{4} (13 - 1) = 1,592 \text{ Т} < P_{\text{б.мин}} = 1,6 \text{ Т};$$

– ряд II ступени:

$$P_{\text{газ}} = \frac{\pi \cdot D_{II}^2}{4} \cdot (p_{\text{нрг}} - p_{\text{атм}}) = \frac{\pi \cdot 4,5^2}{4} (13 - 1) = 1,176 \text{ Т} < P_{\text{б.мин}} = 1,6 \text{ Т}.$$

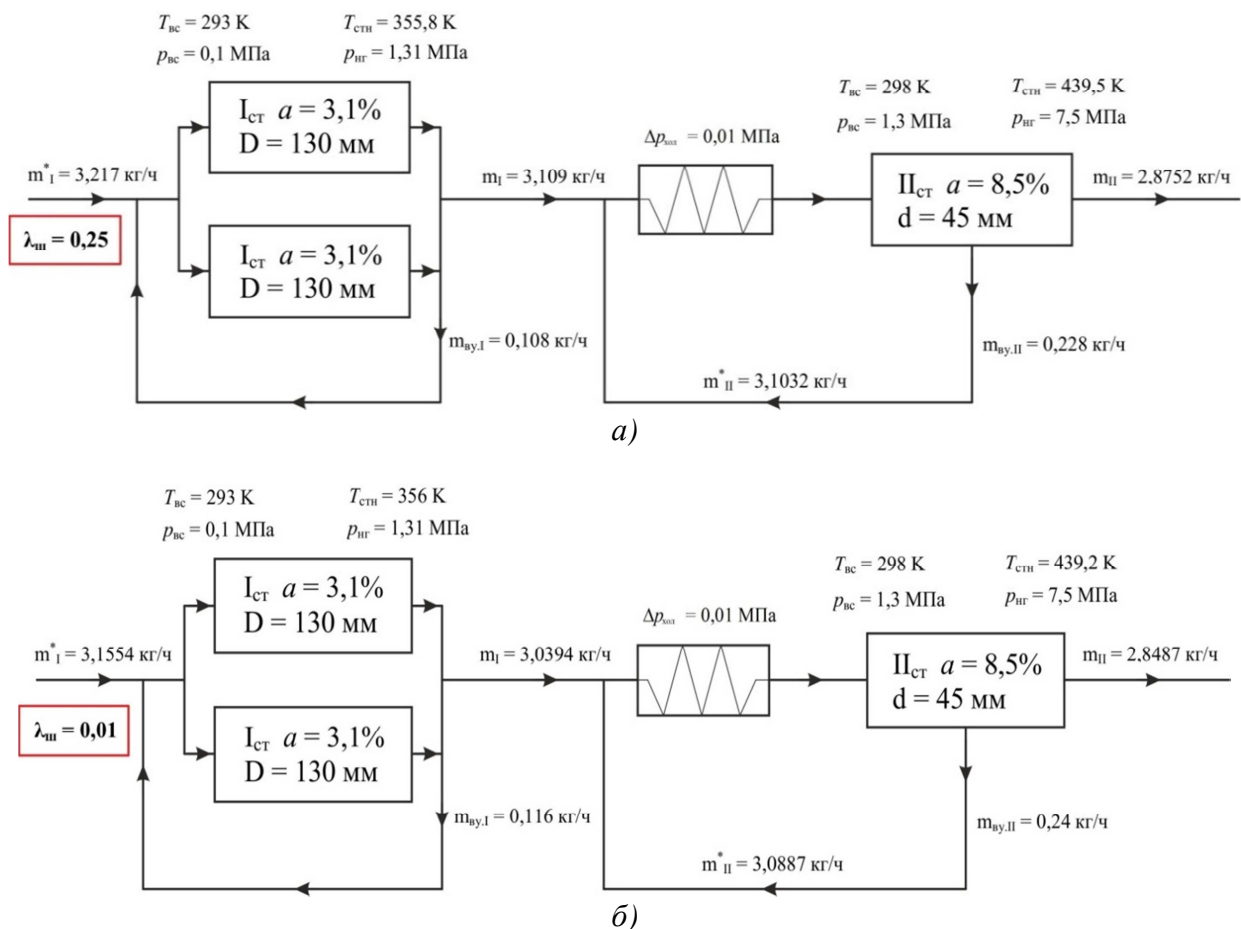


Рис. 2. Схема и параметры газового тракта компрессора ЭГК-15-1-75 при комплектации различными механизмами движения:

а – кривошипно-шатунный механизм движения ($\lambda_{\text{ш}}=0,25$); б – линейный привод ($\lambda_{\text{ш}} \rightarrow 0$).

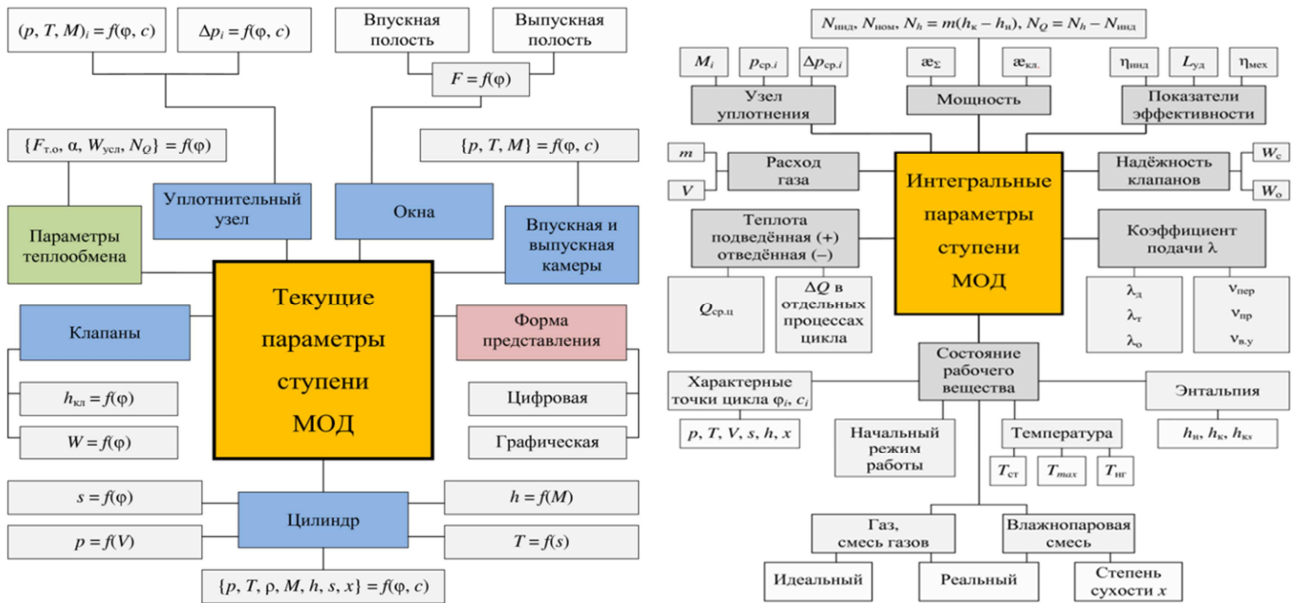


Рис. 3. Выходная информация, полученная при работе с программой «КОМДЕТ»

2. Обосновывается требуемое сочетание диаметра цилиндра D , относительного мертвого пространства a и $p_{вс}$ Z -й ступени компрессора (см. рис. 2), при котором с учетом реальных зазоров и принятых системах охлаждения и смазки массовый расход газа на выходе Z -й ступени m_z будет соответствовать необходимой объемной производительности компрессора $V_{вс} = \frac{m_z}{\rho_{вс.1}} = 15 \text{ м}^3/\text{ч}$.

3. Определяются внешние утечки газа в Z -й ступени $\Delta m_{вz}$ и требуемый массовый расход газа на выходе $Z-1$ ступени в виде $m_{z-1} = m_z + \Delta m_{вz}$, что обеспечивает выполнение условия неразрывности потока газа в газовом тракте компрессора. Графическое отображение основных текущих параметров компрессора представлено на рис. 4. Количество теплоты, переданное от газа элементам ступени, отображено на рис. 5. На рис. 6 представлено изменение характеристик параметров I ступени ЭГК-15-1-75С в процессе расширения. Для более конкретного понимания процессов на этих диаграммах указаны следующие характерные точки рабочего цикла компрессора:

- 1 – $\varphi = 180^\circ$ (положение поршня в НМТ), окончание процесса всасывания;
- 1' – закрытие всасывающего клапана, начало процесса сжатия;
- 2 – окончание процесса сжатия, начало открытия нагнетательного клапана;
- 2' – полное открытие нагнетательного клапана;
- 2-2'-3 – процесс нагнетания;
- 3 – положение поршня в ВМТ ($\varphi = 0^\circ$), нагнетательный клапан открыт;
- 3' – момент закрытия нагнетательного клапана;
- 3-4 – процесс расширения;
- 4 – момент начала открытия всасывающих клапанов;
- 4' – полное открытие всасывающих клапанов;
- p – равенство температур газа и стенок цилиндра на участке расширения;
- c – равенство температур газа и стенок цилиндра на участке сжатия;
- T^* – характерная точка на участке расширения.

Анализ графической информации, представленной на рисунках, позволяет выявить ряд особенностей рабочих процессов в ступенях компрессоров с линейным приводом в условиях низкой частоты рабочих циклов ($\tau_{ц} = 0,3\text{с}$) при средней скорости поршня $C_{п} = 0,73 \text{ м/с}$.

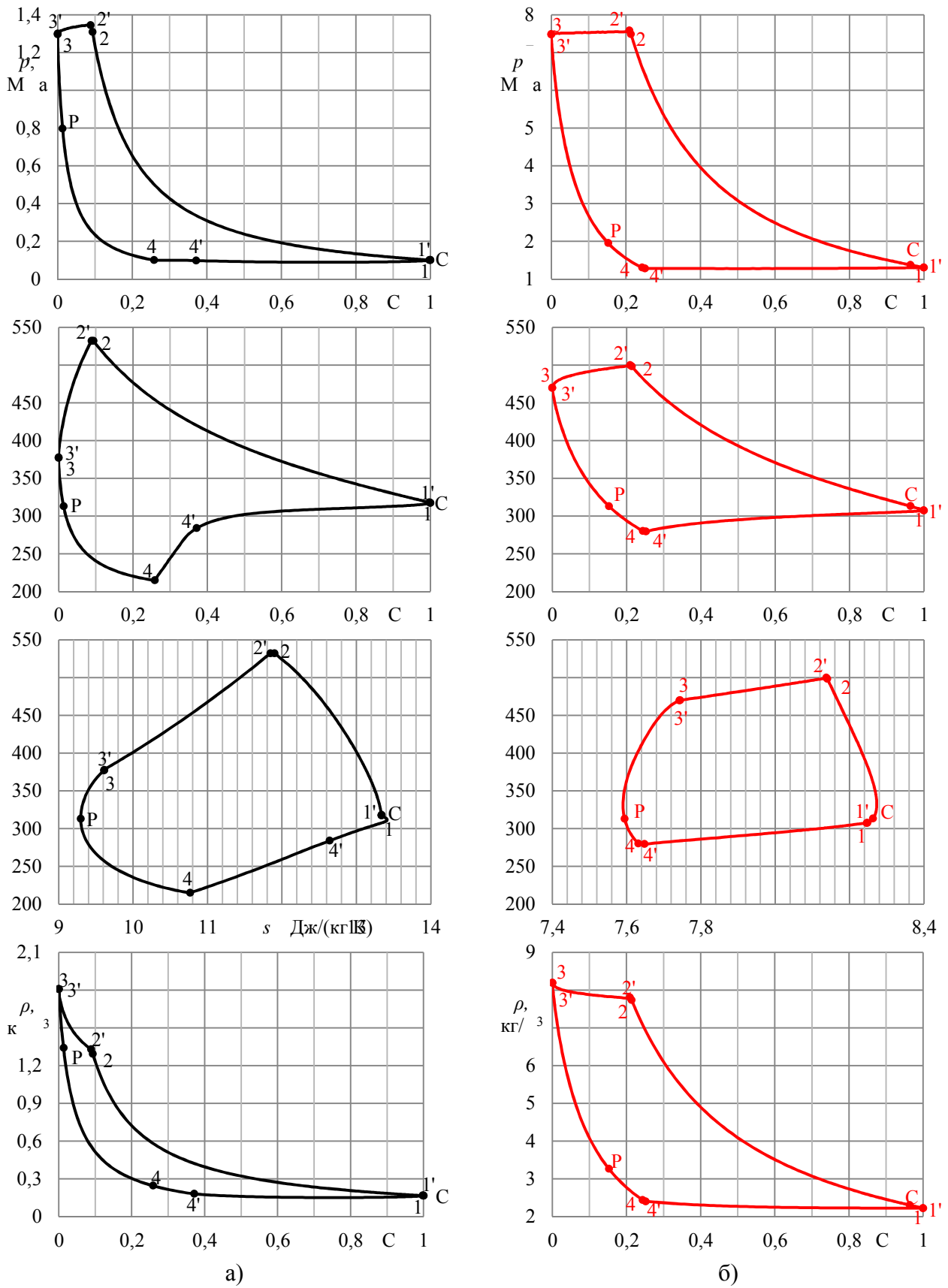


Рис. 4. Основные текущие параметры компрессора ЭГК-15-1-75С:
 а – I ступень ($\Pi=13,1$); б – II ступень ($\Pi=5,77$)

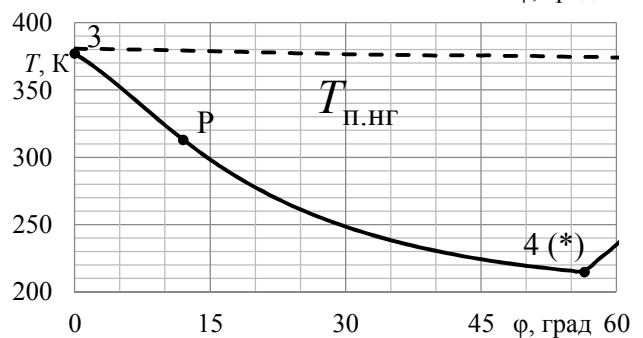
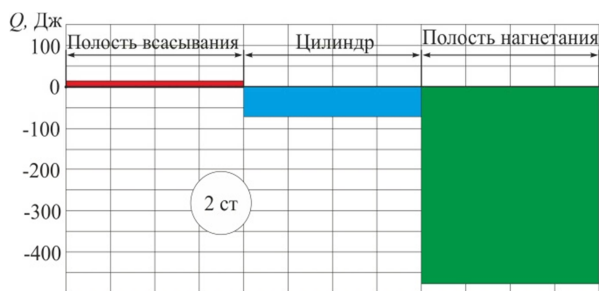
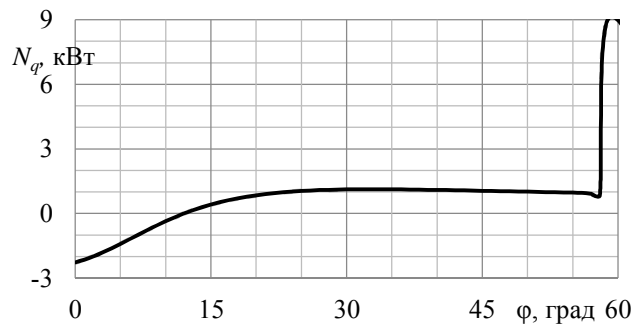
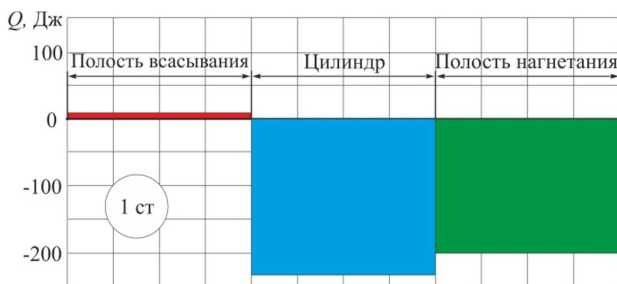
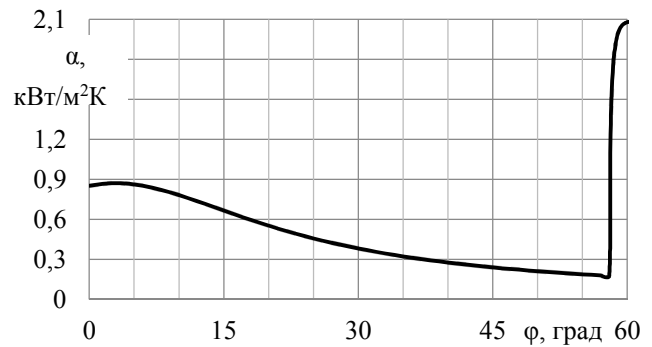
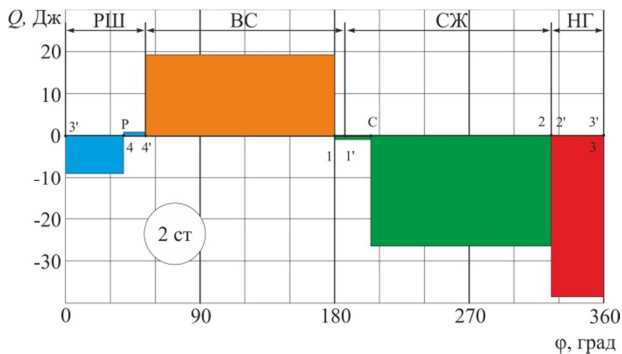
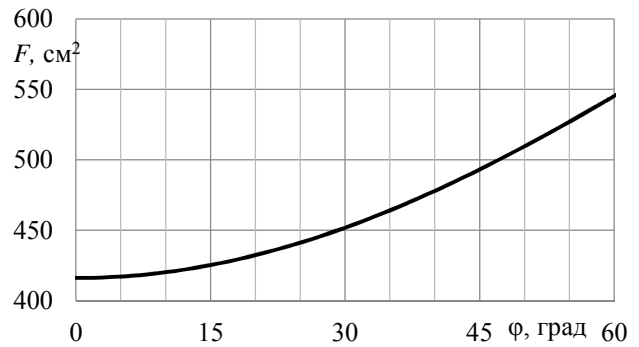
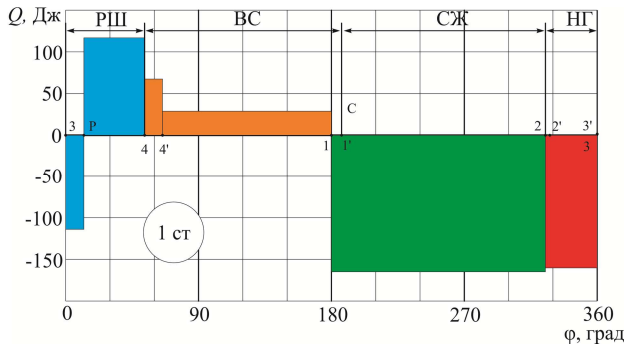


Рис. 5. Количество теплоты, подведенной к газу в элементах ступени ЭГК-15-1-75С

Рис. 6. Изменение характеристик параметров I ступени ЭГК-15-1-75С в процессе РШ

В частности:

1. При практически традиционной форме индикаторной диаграммы первой ступени в координатах $p - (C = S_\phi/S_\Pi = 0 - 1)$ наблюдается коренная трансформация температурных диаграмм, вызванная резким спадом температуры газа на участке нагнетания 2-2'-3 (рис. 4) и соответствующим снижением температуры T_3 и массы газа M_3 в мертвом пространстве ступени. При этом плотность газа в конце процесса нагнетания ρ_3 нарастает, что является отличительной особенностью компрессоров с линейным приводом.

2. Анализ рабочих циклов ступеней компрессора на основе расчетных T - s диаграмм позволил установить преобладающее влияние на трансформацию температурных диаграмм теплообмена газа со стенками цилиндра на участке нагнетания, следствием которого в конце процесса расширения 3-3'-р-4 в цилиндре I ступени при $P_{3-4} = \text{const}$ является понижение температуры газа до уровня ниже 0°C .

3. Закономерности изменения температуры газа во второй ступени те же самые, но в силу большей плотности газа на входе в ступень интенсивность процессов теплообмена резко снижается.

4. При повышенном отношении давлений в I ступени ($P_1=13,1$) уменьшается не только время процесса нагнетания, но и средняя скорость поршня на участке 2-3. Это создает предпосылки для снижения числа клапанов или высоты подъема клапанных пластин, что способствует повышению надежности работы компрессора.

5. Установлены качественные различия процессов расширения 3'-р-4 в I и II ступенях:

– на I ступени в процессе расширения преобладает подвод теплоты от окружающих стенок к газу (участок р-4);

– на II ступени – преобладает отвод теплоты в начале процесса расширения (3-3'-р).

Дополнительная информация, приведенная на рис. 5, позволяет получить представление о рабочих процессах компрессоров с традиционным и линейным приводом, поскольку наблюдаемые в T - S и T - s диаграммах качественные изменения температуры дополняются количественными данными об интенсивности отвода теплоты ($D_{ж}$) не только в каждой из рабочих полостей ступени компрессора, но и на отдельных участках рабочего цикла в цилиндре рассматриваемой ступени.

При определенных сочетаниях геометрических и режимных параметров ступени процесс расширения 3-р-4 может состоять из двух качественно различных участков:

– начальный 3-3'-р- T^* , на котором температура в цилиндре достигает минимума $T=T^*$;

– конечный T^*-T_4 , на котором давление продолжает снижаться, а температура вплоть до открытия всасывающих клапанов (точка 4) возрастает. Впервые это явление было описано в [12] и обосновано как результат двух противоположно влияющих на интенсивность теплообмена газа со стенками цилиндра факторов в процессе расширения: с одной стороны, прогрессирующим ростом текущей теплообменной поверхности цилиндра [рис. 6, $F = f(\varphi)$], а с другой – снижением коэффициента теплоотдачи $\alpha = f(\varphi)$ осредненной по текущей теплообменной поверхности, что в соответствии с уравнением (9) приводит к появлению минимума $T=T^*$ в процессе расширения на участке 3-3'-р- T^* -4.

В настоящей работе в ходе анализа процесса расширения I ступени ЭГК15-1-75С при заданных свойствах рабочей среды, геометрии ступени, режиме ее работы и прочих факторах минимум температуры газа на участке расширения не был установлен, поскольку $T^*=T$.

Интегральные параметры газового компрессора ЭГК-15-1-75С, полученные в ходе численного эксперимента при работе на водород содержащей смеси ВСГ-1, приведены в табл. 2 и 3 для I и II ступеней соответственно.

В параметры входят следующие комплексы:

– исходные данные для ввода в прикладную программу расчета «КОМДЕТ»;

– базовые результаты, включая массовые и объемные расходы, номинальную и индикаторную мощность, газодинамические потери давления в патрубках и клапанах при всасывании и нагнетании и изотермный индикаторный КПД;

– температуры газа в характерных точках цикла рассматриваемой ступени;

– величины коэффициента подачи и его компонентов;

– количество теплоты, подводимой к газу в рабочих полостях ступеней;

– перепады давления на кольцах уплотнительного узла поршня;

– компоненты для расчета мощности трения и механического КПД компрессора.

Исходя из данных, приведенных в табл. 2 и 3, можно графически отобразить зависимость механического КПД отдельных ступеней компрессора и компрессора в целом от величины $\lambda_{ш}$. Такие зависимости представлены на рис. 7.

Таблица 2

Интегральные параметры I ступени компрессора ЭГК-15-1-75С
при $S_{ш}=110$ мм, $n=200$ ц /мин и переменной величине $\lambda_{ш}$

Параметр	Размерность	Индекс вариантов / величина $\lambda_{ш}$						
		А / 0,25	Б / 0,20	В / 0,15	Г / 0,10	Д / 0,05	Е / 0,01	
S / D_1	мм / мм	110 / 130 = 0,856						
a	%	4,0						
$K_{р.ц-ра}$	-	1,5						
$K_{р.пол.вс/нг}$		1,0 / 1,0						
$V_{пол}/d_{тр}$	% / мм	40 / 30						
m_A (вых.)	кг/ч	1,5545	1,5480	1,5409	1,5333	1,5271	1,5197·2	
$\Delta m_{в.у}$		0,0540	0,0550	0,0560	0,0570	0,0580	0,0580·2	
m_A (вход)		1,6085	1,6030	1,5969	1,5903	1,5851	1,5777·2	
V_A ст.у	стм ³ /мин	0,1421	0,1415	0,1408	0,1402	0,1396	0,1389·2	
$N_{инд.А}$	кВт	1,335	1,332	1,329	1,326	1,323	1,3220·2	
$L_{вд}$	кДж/кг	3091,5	3097,0	3105,6	3114,2	3119,7	3131,7	
$\eta_{из.инд}$	-	0,462	0,462	0,460	0,459	0,458	0,457	
T_3	К	378,3	377,1	375,9	374,5	373,1	371,9	
$T_4=T^*$		214,2	214,4	214,8	215,1	215,3	215,5	
T_1		317,3	317,4	317,4	317,6	317,7	317,7	
T_2		532,8	531,9	531,1	530,1	529,3	528,7	
$T_{нг.С}$		608,4						
$T_{нг.ср.}$		478,4	477,3	475,5	474,7	473,6	472,6	
$T_{стн}$		355,8	356,2	357,3	355,7	355,8	356,0	
λ	-	0,4931	0,4910	0,4887	0,4863	0,4843	0,4820	
λ_d		0,9966	0,9967	0,9952	0,9947	0,9938	0,9927	
λ_t		0,9235	0,9231	0,9230	0,9227	0,9223	0,9223	
λ_o		0,6040	0,6021	0,6008	0,5991	0,5965	0,5959	
$\Delta\lambda_{о.вс}$		- 0,0017	- 0,0020	- 0,0024	- 0,0029	- 0,0035	- 0,0041	
$\Delta\lambda_{о.нг}$		- 0,0001	- 0,0001	- 0,0	0,0	- 0,0001	0,0006	
$v_{в.у}$		0,0171	0,0174	0,0177	0,0180	0,0183	0,0186	
$v_{пр}$		0,0473	0,0475	0,0477	0,0482	0,0474	0,0482	
$Q_{ср.СТ}$		Дж	- 340,07	- 343,39	- 350,85	- 342,35	- 343,09	- 345,84
$Q_{ср.пол.Вс}$			5,6123	5,5786	5,6526	5,6236	5,3950	5,3943
$Q_{ср.ЦИЛ-Р}$	- 228,03		- 228,92	- 229,99	- 230,89	- 231,60	- 232,62	
$Q_{ср.пол.НГ}$	- 117,65		- 120,05	- 126,52	- 117,08	- 116,88	- 118,61	
Δp_1 кольцо	МПа	0,052	0,051	0,051	0,050	0,050	0,049	
Δp_2 кольцо		0,036	0,036	0,036	0,036	0,036	0,036	
Δp_3 кольцо		0,034	0,034	0,034	0,033	0,033	0,033	
Δp_4 кольцо		0,054	0,055	0,056	0,057	0,058	0,058	
$\sum N_{тр. п.к}$	кВт	0,072	0,072	0,072	0,072	0,073	0,073	
$N_{тр. п-цил}$		0,080	0,064	0,049	0,033	0,016	0,003	
$\sum N_{тр.С}$		0,152	0,137	0,121	0,105	0,089	0,076	
$\sum N_{тр.о}$		0,061	0,055	0,048	0,042	0,036	0,030	
$\eta_{мех. I ст}$	-	0,862	0,874	0,887	0,900	0,914	0,926	

Таблица 3

**Параметры II ступени экспериментального компрессора ЭГК-15-1-75С
при $S_{II} = 110$ мм и переменной величине λ_{III}**

Параметр	Размерность	Индекс варианта / отношение λ_{III}						
		А / 0,25	Б / 0,20	В / 0,15	Г / 0,10	Д / 0,05	Е / 0,01	
S / D_I	мм / мм	110 / 45 = 2,444						
a	%	8,5						
$K_{р.ц-ра}$	–	3,0						
$K_{р.пол.вс/нг}$	–	1,0 / 1,0						
$V_{пол}/d_{тр}$	% / мм	25 / 30						
m_A (вых)	кг/ч	2,8752	2,8705	2,8651	2,8590	2,8537	2,8487	
$\Delta m_{в.у}$		0,2280	0,2300	0,2330	0,2350	0,2380	0,2400	
m_A (вход)		3,1032	3,1005	3,0981	3,0940	3,0917	3,0887	
V_A ст.у	СтМ ³ /МИН	0,2628	0,2624	0,2619	0,2613	0,2608	0,2604	
$N_{инд.А}$	кВт	1,397	1,396	1,396	1,395	1,395	1,395	
$L_{вд}$	кДж/кг	1749,2	1751,0	1753,6	1756,8	1759,5	1762,4	
$\eta_{из.инд}$	–	0,569	0,568	0,567	0,566	0,566	0,565	
T_3	К	440,7	440,0	439,3	438,6	437,9	437,2	
$T_4=T^*$		261,7	261,4	261,0	260,7	260,3	260,0	
T_1		309,9	309,8	309,8	309,7	309,6	309,5	
T_2		495,2	495,1	494,8	494,6	494,4	494,1	
$T_{нг.С}$		491,35						
$T_{нг.ср.}$		476,3	475,7	475,2	474,6	474,0	473,6	
$T_{стн}$		439,5	439,4	439,3	439,3	439,2	439,2	
λ	–	0,5981	0,5972	0,5960	0,5948	0,5937	0,5926	
λ_d		0,9996	1,0002	1,0001	1,0001	1,0001	0,9996	
λ_t		0,9617	0,9618	0,9620	0,9622	0,9624	0,9628	
λ_o		0,7484	0,7479	0,7474	0,7470	0,7465	0,7462	
$\Delta\lambda_{о.вс}$		- 0,0008	- 0,0007	- 0,0007	- 0,0007	- 0,0007	- 0,0009	
$\Delta\lambda_{о.нг}$		- 0,0002	- 0,0003	- 0,0003	0,0003	- 0,0003	- 0,0003	
$v_{в.у}$		0,0474	0,0479	0,0485	0,0489	0,0495	0,0499	
$v_{пр}$		0,0749	0,0753	0,0755	0,0761	0,0763	0,0768	
$Q_{ср.СТУП.}$		Дж	- 785,70	- 786,55	- 787,04	- 787,61	- 788,62	- 789,66
$Q_{ср.пол.ВС}$			- 1,7081	- 1,7572	- 1,8141	- 1,8568	- 1,9197	- 1,9633
$Q_{ср.ЦИЛ-Р}$	- 97,221		- 97,874	- 98,497	- 99,078	- 99,767	- 100,31	
$Q_{ср.пол.НГ}$	- 686,77		- 686,92	- 686,72	- 686,68	- 686,93	- 687,38	
Δp_1 кольцо	МПа	0,460	0,456	0,452	0,450	0,448	0,447	
Δp_2 кольцо		0,478	0,479	0,480	0,480	0,481	0,480	
Δp_3 кольцо		0,420	0,419	0,418	0,416	0,414	0,413	
Δp_4 кольцо		1,332	1,336	1,339	1,342	1,345	1,347	
$\sum N_{тр. п.к}$	кВт	0,293	0,293	0,292	0,291	0,291	0,290	
$N_{тр. п-цил}$		0,175	0,140	0,105	0,070	0,035	0,007	
$\sum N_{тр.С}$		0,468	0,432	0,397	0,361	0,326	0,297	
$\sum N_{тр.о}$		0,187	0,173	0,159	0,144	0,130	0,119	
$\eta_{мех. II ст}$	–	0,681	0,698	0,715	0,734	0,753	0,770	
$N_{из.к}$	кВт	1,916	1,9129	1,9093	1,9052	1,9017	1,8984	
$\sum N_{инд.к}$		4,067	4,060	4,054	4,047	4,041	4,039	
$\eta_{из. инд.к}$	–	0,4711	0,4712	0,4710	0,4708	0,4706	0,4700	
$\sum N_{тр.С+\omega}$	кВт	1,081	1,029	0,894	0,799	0,706	0,628	
$N_{в.к}$		5,148	5,089	4,948	4,846	4,747	4,667	
$\eta_{мех к}$	–	0,790	0,804	0,819	0,835	0,851	0,865	
$\eta_{из.к} = \eta_{из. инд.к} \cdot \eta_{мех к}$		0,3722	0,3759	0,3859	0,3931	0,4006	0,4068	

С целью пояснения взаимосвязи данных, приведенных в табл. 2 и 3, ниже показан алгоритм и результаты расчета величины механического КПД компрессора ЭГК-15-1-7,5С с крилошипно-шатунным механизмом движения (вариант А в табл. 2 и 3).

1. Производительность компрессора при условиях всасывания:

$$V_{\text{вс}} = \frac{m_{\text{ц}}}{\rho_{\text{вс.г}}} = \frac{2,8752}{(60 \cdot 0,17995)} = 0,2663 \text{ м}^3/\text{мин} = 15,98 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

2. Изотермическая мощность компрессора:

$$N_{\text{из.к}} = p_{\text{вс}} \cdot V_{\text{вс}} \cdot \ln \Pi_{\text{к}} = 0,1 \cdot 10^6 \cdot \frac{0,2663}{60} \cdot 10^{-3} \ln \left(\frac{7,5}{0,1} \right) = 1,916 \text{ кВт}.$$

3. Суммарная индикаторная мощность ступеней компрессора:

$$\sum N_{\text{инд(I+II)·ст}} = 2 \cdot 1,335 + 1,397 = 4,067 \text{ кВт}.$$

4. Изотермический индикаторный КПД компрессора:

$$\eta_{\text{из.инд.к}} = \frac{N_{\text{из.к}}}{N_{\text{инд(I+II)·ст}}} = \frac{1,916}{4,067} = 0,4711.$$

5. Суммарная мощность трения компрессора:

$$\sum (N_{\text{тр.с}} + N_{\text{тр.}\omega})_{\text{I+II}} = 2 \cdot (0,152 + 0,061) + (0,468 + 0,187) = 1,081 \text{ кВт}.$$

6. Мощность на валу компрессора:

$$N_{\text{в.к}} = \sum N_{\text{инд(I+II)·ст}} + \sum (N_{\text{тр.с}} + N_{\text{тр.}\omega})_{\text{I+II}} = 4,067 + 1,081 = 5,148 \text{ кВт}.$$

7. Механический КПД компрессора:

$$\eta_{\text{мех}} = \frac{\sum N_{\text{инд(I+II)·ст}}}{N_{\text{в.к}}} = \frac{4,067}{5,148} = 0,790.$$

8. Изотермический КПД компрессора:

$$\eta_{\text{из.к}} = \frac{N_{\text{из.к}}}{N_{\text{в.к}}} = \frac{1,916}{5,148} = 0,3722.$$

9. Удельная потребляемая мощность:

$$N_{\text{уд.к}} = \frac{N_{\text{в.к}}}{V_{\text{вс}}} = \frac{5,148}{0,2663} = 19,33 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^3/\text{мин}}.$$

Анализируя данные, приведенные в табл. 2 и 3, совместно с графической информацией на рис. 7, отметим следующее:

1. Дискретное снижение величины $\lambda_{\text{ш}}$ в сторону понижения приводит к уменьшению радиальной силы H (рис.1), что сопровождается снижением мощности трения в парах трения «направляющие кольца – цилиндр» $N_{\text{тр.п-цил}}$ обеих ступеней. Затраты на преодоление трения в парах «уплотнительные кольца – цилиндр» $\sum N_{\text{тр.пк}}$ в этом случае остаются неизменными. В итоге происходит снижение мощности в парах трения при возвратно-поступательном $N_{\text{тр.с}}$ и вращательном $N_{\text{тр.}\omega}$ движении, а следовательно, и суммарной мощности трения компрессора $\sum (N_{\text{тр.с}} + N_{\text{тр.}\omega})_{\text{I+II}}$.

2. В рассмотренном случае снижение величины $\lambda_{\text{ш}}$ практически не влияет на базовые технико-экономические показатели объекта исследования. На это указывает постоянство коэффициента подачи λ , объемной производительности $V_{\text{с.у}}$, индикаторной мощности $N_{\text{инд}}$ и изотермического индикаторного КПД ступеней компрессора $\eta_{\text{из.инд}}$ в функции от $\lambda_{\text{ш}}$.

3. Снижение величины $\lambda_{\text{ш}}$ слабо отражается на тепловом состоянии ступеней. Так, температура газа на нагнетании I ступени в заданном диапазоне $\lambda_{\text{ш}}$ уменьшается на 4-5 К, а на II ступени – практически остается постоянной.

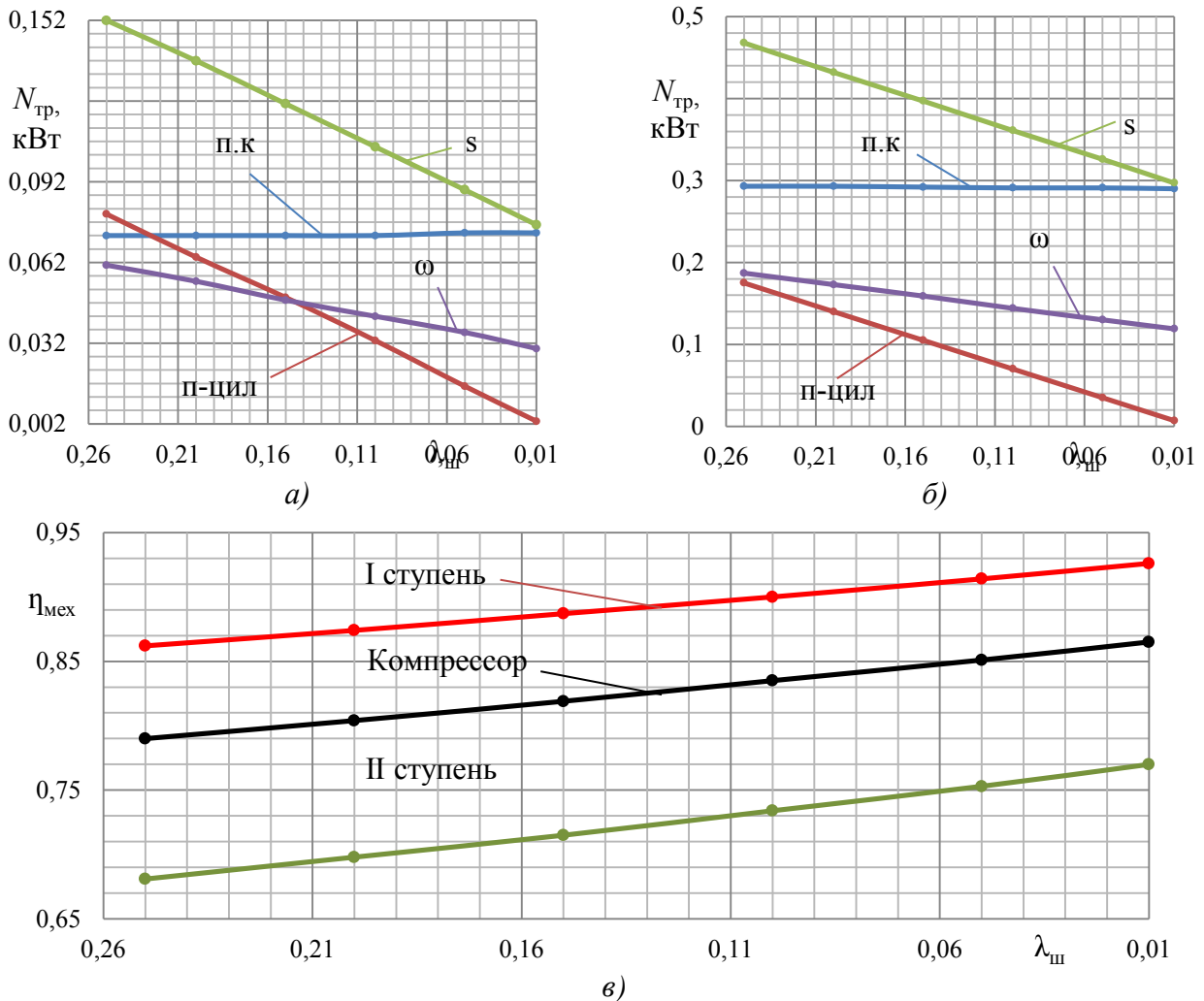


Рис. 7. Изменение механического КПД в зависимости от $\lambda_{ш}$:
 а – для I ступени; б – для II ступени; в – для компрессора в целом

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Резюмируя изложенное выше, можно сделать вывод, что при переводе малорасходных поршневых компрессоров на линейный привод при прочих равных условиях можно ожидать повышение эффективности их работы за счет увеличения механического КПД на 7-8% и общего изотермного КПД компрессора на 3-4%. Вместе с тем результаты численного анализа позволили:

- выявить, изучить и научно обосновать новые качественные и количественные закономерности процессов теплообмена и массопереноса в поршневых компрессорах с линейным приводом;
- дифференцировать газодинамические потери в каналах клапанов, в патрубках полостей всасывания и нагнетания и в элементах газовых трактов;
- проанализировать возможные конструктивные недостатки уплотнительных узлов поршней и сальников в ступенях высокого давления ($p_{нг} = 40$ МПа) при перепадах давлений на кольцах в диапазоне 3–10 МПа и наметить задачи, решение которых будет способствовать созданию герметичных и износостойких уплотнительных узлов;
- обосновать перспективные направления совершенствования схемных решений компрессоров с линейным приводом, конструкций, методов расчета и прогнозирования показателей надежности их работы в затраты на преодоление механического трения в узлах с вращатель-

ным и возвратно-поступательным движением элементов малорасходных компрессоров с линейным приводом;

– рекомендовать научно обоснованные, близкие к «оптимуму» технические решения на стадии эскизного проекта и минимизировать материальные и временные затраты на проведение испытаний макетных и опытных образцов новой техники.

Список используемых источников

1. Программа «КОМДЕТ» (Инструкция пользователю): методические указания к практическим занятиям по дисциплинам «Машины низкотемпературной техники», «Компрессорные машины», «Расширительные машины» / А.И. Прилуцкий, И.К. Прилуцкий, Д.Н. Иванов и др. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2009. – 16 с

2. *Деньгин В.Г., Громов А.Ю., Ермаков А.В.* Поршневой компрессорный агрегат с улучшенными виброшумовыми характеристиками для систем жизнеобеспечения объектов Военно-морского флота // Компрессорная техника и пневматика. – 2017. – № 4. – С. 15–21.

3. *Аврущенко А.Е., Новиков А.Ф., Френкель В.И.* Системы электрохимической регенерации воздуха атомных подводных лодок. – М.: Русская история, 2002. – 431 с.

4. ОАО Компрессор: электронный каталог продукции. – URL: <http://www.compressor.spb.ru/perehenq.pdf>. (дата обращения: 17.06.2019).

5. Опыт практического применения методов моделирования при доводке уплотнительных узлов ступеней поршневых компрессоров на стадии проектирования / И.К. Прилуцкий, Д.Н. Иванов, Е.И. Замолоцкая и др. // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2004. – № 9. – С. 27–30.

6. Оценка герметичности компрессорных ступеней с учетом износа уплотнений поршня при эксплуатации / Л.Г. Кузнецов, Д.Н. Иванов, Ю.И. Молодова и др. // Холодильная техника. – 2004. – № 3. – С. 28–31.

7. *Прилуцкий И.К., Прилуцкий А.И., Молодова Ю.И.* Анализ характеристик ступеней поршневых компрессоров при работе на различных газах // Технические газы. – 2013. – № 1. – С. 62–68.

8. *Прилуцкий И.К., Ворошилов И.В.* Опыт практического применения прикладной программы «КОМДЕТ» при оптимизации рабочих процессов и конструкций ступеней ПК и ПД на стадии проектирования: сборник докладов науч.-практ. конф. – Краснодар, 2013. – С. 34–48.

9. *Прилуцкий И.К.* Разработка, исследование и создание компрессоров и детандеров для криогенной техники: дисс. на соиск. уч. ст. д-ра техн. наук. – Л.: Ленинградский Технологический институт холодильной промышленности, 1991.

10. *Прилуцкий А.И.* Развитие теории, методов расчета и оптимального проектирования поршневых компрессорных и расширительных машин: дисс. на соиск. уч. ст. д-ра техн. наук. – СПб.: Университет ИТМО, 2015.

11. *Мамонтов М.А.* Вопросы термодинамики тела переменной массы. – М.: Оборонгиз, 1963.

12. Особенности процессов теплообмена в ступенях малорасходных машин объемного действия с различными механизмами движения / И.К. Прилуцкий, Ю.И. Молодова, А.А. Сназин и др. // ВЕСТНИК МАХ. – 2017. – № 4. – С. 30–40.

13. *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1970. – 904 с.

14. *Прилуцкий И.К.* Метод определения мгновенных локальных коэффициентов теплоотдачи в элементах ступеней машин объемного действия // Технические газы. – 2013. – №4. – С. 19–26.

15. Поршневые компрессоры: учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности «Холодильные и компрессорные машины и установки» / Б.С. Фотин, И.Б. Пирумов, И.К. Прилуцкий и др. – Л.: Машиностроение, 1987. – 372 с.

16. *Френкель М.И.* Поршневые компрессоры. – Л.: Машиностроение, 1979. – 616 с.
17. *Пластинин П.И.* Поршневые компрессоры, – М.: Колос, 2000. – Т. 1. – 456 с.
18. The estimation of expediency of the cylinder internal finning in the single-stage compressor with a temporary-rotary operating mode / I.K. Prilutskiy, A.I. Prilutskiy, P.O. Galyaev et. // *Procedia Engineering*. – Vol. 113. – P. 233–236 1. – URL: <http://WWW.sciencedirect.com/science/journal/18777058/113> (дата обращения: 17.06.2019).
19. The forecasting of single-row reciprocating expander temperature fields / Prilutskiy I.K., Prilutskiy A.I., Snazin A.A. [et.] // *Procedia Engineering*. – 2016. – Vol. 152. – P. 412–419.
20. Передвижные компрессорные станции. Перспективы развития / И.К. Прилуцкий, А.В. Казимиров, Ю.И. Молодова и др. // *Компрессорная техника и пневматика*. – 2019. – № 1. – С. 24–30.

В.И. Гера,
кандидат техн. наук, доцент;
Е.В. Калмыков;
О.С. Нестеров

ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ОСНОВНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖАНИЯ В ГОТОВНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКИХ ВОЙСК

В данной публикации заданы требования к системе поддержания в готовности с учетом текущего технического состояния рассматриваемой системы. При решении поставленной задачи была построена и описана графовая модель функционирования технической системы, содержащая подсистему технического обеспечения. Для получения аналитической зависимости, характеризующей модель, в решении использовался подход исследования полумарковских процессов с вложенными марковскими цепями. Предложенный подход позволяет решить задачу комплексного обоснования требований к характеристикам системы поддержания в готовности изделий военной техники, выбрав ее вариант с тем набором указанных параметров, который обеспечивает требуемое значение коэффициента готовности K_r .

Ключевые слова: отказ, ремонт, техническое обслуживание, технические системы, эксплуатация, граф, модель, вероятность.

ВВЕДЕНИЕ

Работоспособность изделий технических систем комплексов вооружения в значительной степени зависит от их сложности, условий применения, особенностей конструктивных решений, характера протекающих рабочих процессов и стабильности эксплуатационно-технических характеристик.

Важной особенностью инженерно-технических систем (ТС) современных комплексов вооружения космических войск является то, что ввод их в эксплуатацию осуществляется раньше технологического оборудования комплекса, а назначенный ресурс (срок службы) значительно ниже. Данное обстоятельство предопределяет более ранний переход на поддержание их в готовности по фактическому техническому состоянию, следовательно, представляется необходимым обосновать основные характеристики системы поддержания в готовности ТС.

Наиболее содержательные модели процесса эксплуатации вооружения были получены с помощью математического аппарата теории полумарковских процессов и представлены в работах [1, 2]. Данные модели адекватно описывают поведение систем при применении календарной стратегии обслуживания (штатной эксплуатации в соответствии с эксплуатационной документацией) и не совсем корректно, по мнению авторов, на этапе возрастания интенсивности отказов и при нерасчетных внешних воздействиях (в том числе противника). Когда возникает необходимость в оперативном восстановлении системы и решении вопроса, какие силы и средства для этого необходимы?

С учетом указанной проблемы объектом рассмотрения в данной публикации будет *система поддержания в готовности и восстановления ТС*, под которой будем понимать совокупность сил и средств эксплуатирующей организации и системы технического обеспечения, предназначенных для восстановления и поддержания в готовности технических систем.

К основным характеристикам системы поддержания в готовности относятся:

– среднее время пребывания системы на обслуживании (восстановлении) в местах проведения работ [на месте эксплуатации, в ремонтных органах старшего начальника, на предприятии промышленности (ПП)];

– оптимальный объем выполняемых работ элементами системы поддержания в готовности и их организационная структура.

Применительно к ТС восстановление работоспособности при штатной эксплуатации предусмотрено в следующих объемах (левая часть рис. 1):

– периодических технических обслуживаний (ТО) ТО1, ТО2, проводимых обслуживающим персоналом (ОП), в объеме и с периодичностью, установленной в эксплуатационной документации;

– среднего ремонта (СР), выполнение которого предусмотрено силами старшего начальника (СН) (батальон энергосбережения, эксплуатационно-техническая рота, электротехнические подразделения) или представителями промышленности, в объеме и с периодичностью, установленной в ремонтной документации;

– капитального ремонта (КР), выполняемого с привлечением сил предприятий-изготовителей, в объеме и с периодичностью, установленной в ремонтной документации.

С возрастанием интенсивности отказов (вследствие деградационных процессов) им подвергаются в том числе элементы системы, поддержание в готовности (восстановление) которых не предусмотрено эксплуатационной документацией. Поэтому необходимо с учетом текущего технического состояния задать требования к системе поддержания в готовности и восстановления, а также задать требования по восстановлению ТС при нерасчетных внешних воздействиях.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ПОДДЕРЖАНИЯ В ГОТОВНОСТИ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

Рассмотрим систему взаимосвязи функционального состояния, технического обслуживания и ремонта эксплуатируемой технической системы.

Допустим, система может находиться в работоспособном либо в неработоспособном состоянии. Эксплуатационные процессы опишем графовой моделью, представленной на рис. 1.

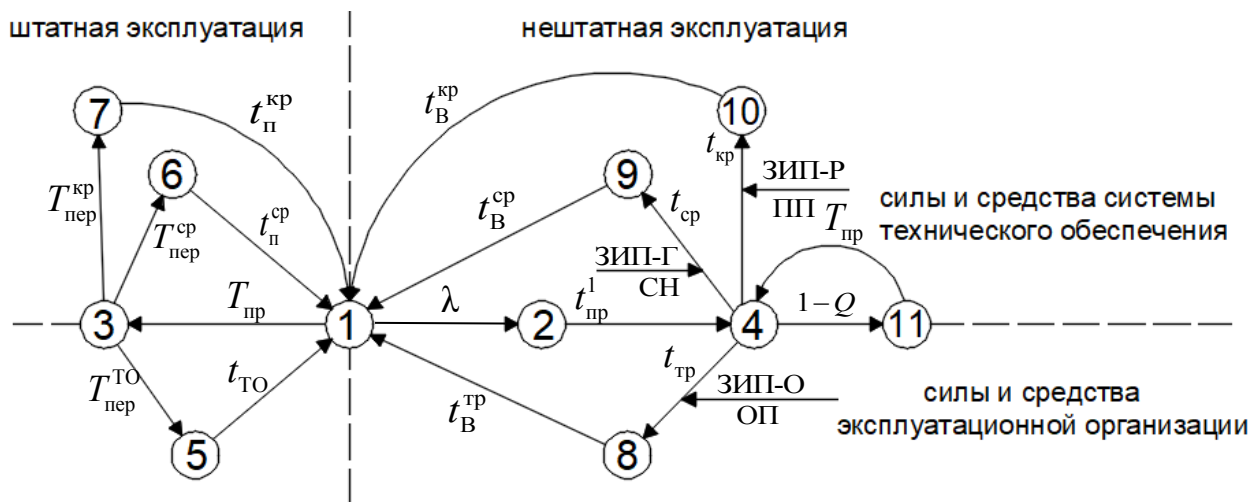


Рис. 1. Графовая модель процесса поддержания в готовности и восстановления ТС

На рис. 1 введены следующие обозначения:

- 1 – ТС находится в работоспособном состоянии;
- 2 – ТС находится в неработоспособном состоянии вследствие отказа;
- 3 – ТС в состоянии планового контроля работоспособности (диагностики) перед ТО, СР, КР;
- 4 – ТС диагностируется для локализации выявленного отказа и определения требуемого ЗИП, сил и средств для восстановления;

5 – ТС проходит плановое техническое обслуживание;

6 – на ТС проводится текущий ремонт (средний ремонт);

7 – на ТС проводится капитальный ремонт;

8 – на ТС проводится восстановление с использованием ЗИП-О силами обслуживающего персонала в соответствии с эксплуатационной документацией (текущий ремонт);

9 – на ТС проводится восстановление с привлечением сил старшего начальника (средний ремонт) с использованием ЗИП-Г, ЗИП-Р;

10 – на ТС проводится восстановление с привлечением представителей промышленности (капитальный ремонт) с использованием ЗИП-Р;

11 – ТС функционирует со скрытым отказом до очередной проверки;

$T_{\text{пр}}$ – периодичность контроля ТС в соответствии с эксплуатационной документацией (перед проведением технического обслуживания, среднего и капитального ремонтов соответственно);

$T_{\text{пер}}^{\text{ТО}}$ – периодичность проведения планового технического обслуживания в соответствии с эксплуатационной (ремонтной) документацией;

$T_{\text{пер}}^{\text{ср}}$ – периодичность проведения планового среднего ремонта в соответствии с эксплуатационной (ремонтной) документацией;

$T_{\text{пер}}^{\text{кр}}$ – периодичность проведения планового капитального ремонта в соответствии с эксплуатационной документацией;

$t_{\text{пр}}^{\text{п}}$ – время проведения плановой проверки;

$t_{\text{ТО}}$ – время проведения планового технического обслуживания;

$t_{\text{п}}^{\text{ср}}$ – время проведения планового среднего ремонта;

$t_{\text{п}}^{\text{кр}}$ – время проведения планового капитального ремонта;

$t_{\text{пр}}^1$ – время проверки при отказе системы;

$t_{\text{тр}}$ – время выполнения подготовительных операций перед проведением текущего ремонта;

$t_{\text{ср}}$ – время выполнения подготовительных операций перед проведением среднего ремонта;

$t_{\text{кр}}$ – время выполнения подготовительных операций перед проведением капитального ремонта;

$\mu_{\text{тр}}, t_{\text{В}}^{\text{тр}}$ – интенсивность и время восстановления системы при неплановом текущем ремонте;

$\mu_{\text{ср}}, t_{\text{В}}^{\text{ср}}$ – интенсивность и время восстановления системы при неплановом среднем ремонте;

$\mu_{\text{кр}}, t_{\text{В}}^{\text{кр}}$ – интенсивность и время восстановления системы при проведении непланового капитального ремонта;

Q – вероятность обнаружения отказа;

λ – интенсивность отказов ТС.

Допустим, система может находиться одновременно только в одном состоянии $i = 1, 2, \dots, n$ из множества возможных ($i \in E$). Поток изменения состояний простейший. В начальный момент времени $t=0$ система находится в работоспособном состоянии 1. Через случайное время τ_1 система мгновенно переходит в новое состояние $j \in E$ с вероятностью $p_{ij} \geq 0$, причем $\sum_{j \in E} p_{ij} \leq 1$ для любого $i \in E$. Случайный момент времени возникновения отказа в

системе t , причем $0 < t < T_{\text{пр}}$. В состоянии j элемент пребывает случайное время, прежде чем переходит в следующее состояние [3].

Функции, описывающие переход от i -го к j -му состоянию графа, заданы и представлены в табл. 1.

Таблица 1

Законы переходов от i -го к j -му состоянию графа (см. рис. 1)

i	j					
	1	2	3	4	5	6
1	0	$1 - e^{-\lambda t}$	$\begin{cases} 0, \text{при } t < T_{\text{пр}} \\ 1, \text{при } t \geq T_{\text{пр}} \end{cases}$	0	0	0
2	0	0	0	$e^{-\lambda t_{\text{пр}}}$	0	0
3	0	0	0	0	$\begin{cases} 0, \text{при } t < T_{\text{пер}}^{\text{ТО}} \\ 1, \text{при } t \geq T_{\text{пер}}^{\text{ТО}} \end{cases}$	$\begin{cases} 0, \text{при } t < T_{\text{пер}}^{\text{ср}} \\ 1, \text{при } t \geq T_{\text{пер}}^{\text{ср}} \end{cases}$
4	0	0	0	0	0	0
5	$\begin{cases} 0, \text{при } t < t_{\text{ТО}} \\ 1, \text{при } t \geq t_{\text{ТО}} \end{cases}$	0	0	0	0	0
6	$\begin{cases} 0, \text{при } t < t_{\text{н}}^{\text{ср}} \\ 1, \text{при } t \geq t_{\text{н}}^{\text{ср}} \end{cases}$	0	0	0	0	0
7	$\begin{cases} 0, \text{при } t < t_{\text{н}}^{\text{кр}} \\ 1, \text{при } t \geq t_{\text{н}}^{\text{кр}} \end{cases}$	0	0	0	0	0
8	$e^{-\mu_{\text{пр}} t_{\text{В}}^{\text{пр}}}$	0	0	0	0	0
9	$e^{-\mu_{\text{ср}} t_{\text{В}}^{\text{ср}}}$	0	0	0	0	0
10	$e^{-\mu_{\text{кр}} t_{\text{В}}^{\text{кр}}}$	0	0	0	0	0
11	0	0	0	$e^{-\lambda T_{\text{пр}}}$	0	0

i	j				
	7	8	9	10	11
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0
3	$\begin{cases} 0, \text{при } t < T_{\text{пер}}^{\text{кр}} \\ 1, \text{при } t \geq T_{\text{пер}}^{\text{кр}} \end{cases}$	0	0	0	0
4	0	$\begin{cases} 0, \text{при } t < t_{\text{тр}} \\ 1, \text{при } t \geq t_{\text{тр}} \end{cases}$	$\begin{cases} 0, \text{при } t < t_{\text{ср}} \\ 1, \text{при } t \geq t_{\text{ср}} \end{cases}$	$\begin{cases} 0, \text{при } t < t_{\text{кр}} \\ 1, \text{при } t \geq t_{\text{кр}} \end{cases}$	$\begin{cases} 0, \text{при } t < T_{\text{пр}} \\ 1, \text{при } t \geq T_{\text{пр}} \end{cases}$
5–11	0	0	0	0	0

Переход из работоспособного состояния в состояние отказа и процесс восстановления работоспособного состояния опишем экспоненциальным законом распределения. В [4–5] обосновывается применение указанного закона, который достаточно адекватно описывает длительный эксплуатационный процесс для суммы большого числа независимых стационарных потоков, являющихся асимптотическим пуассоновским потоком. Допустим также, что комплекты ЗИП-Г, ЗИП-Р, ЗИП-О пополняются без задержек, своевременно.

Для расчета коэффициента готовности ТС, необходимо знать законы распределения $F_i(t)$, описывающие случайное время пребывания комплекса в i -м состоянии, вероятность p_{ij} всех перечисленных переходов, а также начальное состояние системы.

Постановка рассматриваемой задачи для сведения ее к полумарковскому процессу должна быть следующей. Задано конечное множество состояний ТС $i = 1, 2, \dots, n$ из множества возможных ($i \in E$), для которых определены вероятности перехода со свойствами

$$0 \leq p_{ij} \leq 1; \sum_{j \in E} p_{ij} = 1, i \in E,$$

а также распределения $F_i(t)$ времени $\tau_i > 0$ пребывания ТС в i -м состоянии:

$$F_i(t) = \text{вер}(\tau_i < t), F_i(+0) = 0, i \in E.$$

Условные функции распределения продолжительности пребывания в состояниях имеют вид:

$$F_{1,2}(t) = \begin{cases} 0, & t \leq 0 \\ 1 - e^{-\lambda t}, & 0 < t < T_{\text{нп}} \\ 1, & t \geq T_{\text{нп}} \end{cases}; F_{1,3}(t) = \begin{cases} 0, & t < T_{\text{нп}} \\ 1, & t \geq T_{\text{нп}} \end{cases}; F_{2,4} = \begin{cases} 0, & t \leq 0 \\ e^{-\lambda t}, & 0 < t < T_{\text{нп}} \\ 1, & t \geq T_{\text{нп}} \end{cases};$$

$$F_{3,5}(t) = \begin{cases} 0, & t < T_{\text{нп}}^{\text{ТО}} \\ 1, & t \geq T_{\text{нп}}^{\text{ТО}} \end{cases}; F_{3,6}(t) = \begin{cases} 0, & t < T_{\text{нп}}^{\text{ср}} \\ 1, & t \geq T_{\text{нп}}^{\text{ср}} \end{cases}; F_{3,7}(t) = \begin{cases} 0, & t < T_{\text{нп}}^{\text{кр}} \\ 1, & t \geq T_{\text{нп}}^{\text{кр}} \end{cases};$$

$$F_{4,8}(t) = \begin{cases} 0, & t < t_{\text{нп}} \\ 1, & t \geq t_{\text{нп}} \end{cases}; F_{4,9}(t) = \begin{cases} 0, & t < t_{\text{ср}} \\ 1, & t \geq t_{\text{ср}} \end{cases}; F_{4,10}(t) = \begin{cases} 0, & t < t_{\text{кр}} \\ 1, & t \geq t_{\text{кр}} \end{cases};$$

$$F_{4,11}(t) = \begin{cases} 0, & t < T_{\text{нп}} \\ 1, & t \geq T_{\text{нп}} \end{cases}; F_{7,1}(t) = \begin{cases} 0, & t < t_{\text{н}}^{\text{кр}} \\ 1, & t \geq t_{\text{н}}^{\text{кр}} \end{cases}; F_{6,1}(t) = \begin{cases} 0, & t < t_{\text{н}}^{\text{ср}} \\ 1, & t \geq t_{\text{н}}^{\text{ср}} \end{cases};$$

$$F_{5,1}(t) = \begin{cases} 0, & t < t_{\text{ТО}} \\ 1, & t \geq t_{\text{ТО}} \end{cases}; F_{8,1}(t) = e^{-\mu_{\text{нп}} t_{\text{нп}}}; F_{9,1}(t) = e^{-\mu_{\text{ср}} t_{\text{ср}}}; F_{10,1}(t) = e^{-\mu_{\text{кр}} t_{\text{кр}}}; F_{11,4}(t) = e^{-\lambda T_{\text{нп}}};$$

Безусловные функции распределения $F_i(t)$ времени нахождения в состоянии описываются выражением

$$F_i(t) = \sum_{j=1}^n p_{ij} F_{ij}(t), \quad (1)$$

где p_{ij} – вероятность перехода вложенной марковской цепи. При этом:

$$F_1(t) = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda t}, & t < T_{\text{нп}} \\ 1, & t \geq T_{\text{нп}} \end{cases}; F_2(t) = e^{-\lambda t}; F_3(t) = \begin{cases} 0, & t < t_{\text{нп}}^{\text{н}} \\ 1, & t \geq t_{\text{нп}}^{\text{н}} \end{cases}; F_4(t) = \begin{cases} 0, & t < t_{\text{нп}}^{\text{л}} \\ 1, & t \geq t_{\text{нп}}^{\text{л}} \end{cases}; F_5(t) = \begin{cases} 0, & t < t_{\text{ТО}} \\ 1, & t \geq t_{\text{ТО}} \end{cases};$$

$$F_6(t) = \begin{cases} 0, & t < t_{\text{н}}^{\text{ср}} \\ 1, & t \geq t_{\text{н}}^{\text{ср}} \end{cases}; F_7(t) = \begin{cases} 0, & t < t_{\text{н}}^{\text{кр}} \\ 1, & t \geq t_{\text{н}}^{\text{кр}} \end{cases}; F_8(t) = e^{-\mu_{\text{тр}} t_{\text{н}}^{\text{ср}}}; F_9(t) = e^{-\mu_{\text{ср}} t_{\text{н}}^{\text{ср}}}; F_{10}(t) = e^{-\mu_{\text{кр}} t_{\text{н}}^{\text{ср}}};$$

$$F_{11}(t) = e^{-\lambda T_{\text{нр}}};$$

Далее находим математическое ожидание продолжительности пребывания в состоянии i до ухода из него, которое определяется по формуле

$$\bar{t}_i = \int_{t_{\phi}}^{t_{\gamma}} [1 - F_i(t)] dt \tag{2}$$

где t_{ϕ} – нижняя граница времени пребывания системы в данном состоянии;

t_{γ} – верхняя граница времени пребывания системы в данном состоянии.

Тогда

$$\bar{t}_1 = \frac{1 - e^{-\lambda T_{\text{нр}}}}{\lambda}, \quad \bar{t}_2 = t_{\text{нр}}^1 + \frac{e^{-\lambda t_{\text{нр}}^1} - 1}{\lambda}, \quad \bar{t}_3 = t_{\text{нр}}^{\text{н}}, \quad \bar{t}_4 = t_{\text{нр}}^1, \quad \bar{t}_5 = t_{\text{ГО}}, \quad \bar{t}_6 = t_{\text{н}}^{\text{ср}}, \quad \bar{t}_7 = t_{\text{н}}^{\text{кр}},$$

$$\bar{t}_8 = t_{\text{Б}}^{\text{тр}} + \frac{e^{-\mu_{\text{тр}} t_{\text{Б}}^{\text{тр}}} - 1}{\mu_{\text{тр}}}, \quad \bar{t}_9 = t_{\text{Б}}^{\text{ср}} + \frac{e^{-\mu_{\text{ср}} t_{\text{Б}}^{\text{ср}}} - 1}{\mu_{\text{ср}}}, \quad \bar{t}_{10} = t_{\text{Б}}^{\text{кр}} + \frac{e^{-\mu_{\text{кр}} t_{\text{Б}}^{\text{кр}}} - 1}{\mu_{\text{кр}}}, \quad \bar{t}_{11} = T_{\text{нр}} + \frac{e^{-\lambda T_{\text{нр}}} - 1}{\lambda}.$$

Для определения стационарных вероятностей состояний графа составим систему линейных независимых алгебраических уравнений вложенной марковской цепи [3, 6]:

$$\begin{cases} P_1 = P_5 p_{51} + P_6 p_{61} + P_7 p_{71} + P_8 p_{81} + P_9 p_{91} + P_{10} p_{10,1}, \\ P_2 = P_1 p_{12}, \quad P_3 = P_1 p_{13}, \quad P_4 = P_2 p_{24} + P_{11} p_{11,4}, \\ P_5 = P_3 p_{35}, \quad P_6 = P_3 p_{36}, \quad P_7 = P_3 p_{37}, \quad P_8 = P_4 p_{48}, \\ P_9 = P_4 p_{49}, \quad P_{10} = P_4 p_{4,10}, \quad P_{11} = P_4 p_{4,11}. \end{cases} \tag{3}$$

В результате решения системы уравнений методом Гаусса после того, как привели матрицу к треугольному виду, получаем, что $S \cdot P_{11} = 0$ (S – последний элемент в главной диагонали матрицы). Таким образом, из $S \cdot P_{11} = 0$ следует, либо $P_{11} = 0$, но в таком случае $P_i = 0$, для любого $i = 1, 11$, что не удовлетворяет условию нормировки $\sum_{i=1}^{11} P_i = 1$, соответственно, можем сделать вывод, что в выражении $S \cdot P_{11} = 0$ $S = 0$, обозначим $P_{11} = U$, тогда:

$$P_1 = \frac{1 - p_{4,11} p_{11,4}}{p_{12} p_{24} p_{4,11}} \cdot U; \quad P_2 = \frac{1 - p_{4,11} p_{11,4}}{p_{24} p_{4,11}} \cdot U; \quad P_3 = \frac{(1 - p_{4,11} p_{11,4}) p_{13} U}{p_{12} p_{24} p_{4,11}}; \quad P_4 = \frac{1}{p_{4,11}} \cdot U;$$

$$P_5 = \frac{(1 - p_{4,11} p_{11,4}) p_{13} p_{35} U}{p_{12} p_{24} p_{4,11}}; \quad P_6 = \frac{(1 - p_{4,11} p_{11,4}) p_{13} p_{36} U}{p_{12} p_{24} p_{4,11}}; \quad P_7 = \frac{(1 - p_{4,11} p_{11,4}) p_{13} p_{37} U}{p_{12} p_{24} p_{4,11}}; \quad P_8 = \frac{p_{48} U}{p_{4,11}};$$

$$P_9 = \frac{p_{49} U}{p_{4,11}}; \quad P_{10} = \frac{p_{4,10} U}{p_{4,11}}; \quad P_{11} = U.$$

Математическое ожидание длительности одного перехода по состояниям найдем по формуле

$$\bar{t} = \sum_{i=1}^n P_i \bar{t}_i. \tag{4}$$

Раскрывая формулу (4), получим выражение

$$\begin{aligned} \bar{t} = & P_{11} \cdot (\bar{t}_1 \cdot \frac{1 - p_{4,11} p_{11,4}}{p_{12} p_{24} p_{4,11}} + \bar{t}_2 \cdot \frac{1 - p_{4,11} p_{11,4}}{p_{24} p_{4,11}} + \bar{t}_3 \cdot \frac{(1 - p_{4,11} p_{11,4}) p_{13}}{p_{12} p_{24} p_{4,11}} + \bar{t}_4 \cdot \frac{1}{p_{4,11}} + \\ & + \bar{t}_5 \cdot \frac{(1 - p_{4,11} p_{11,4}) p_{13} p_{35}}{p_{12} p_{24} p_{4,11}} + \bar{t}_6 \cdot \frac{(1 - p_{4,11} p_{11,4}) p_{13} p_{36}}{p_{12} p_{24} p_{4,11}} + \bar{t}_7 \cdot \frac{(1 - p_{4,11} p_{11,4}) p_{13} p_{37}}{p_{12} p_{24} p_{4,11}} + \\ & + \bar{t}_8 \cdot \frac{p_{48}}{p_{4,11}} + \bar{t}_9 \cdot \frac{p_{49}}{p_{4,11}} + \bar{t}_{10} \cdot \frac{p_{4,10}}{p_{4,11}} + \bar{t}_{11}). \end{aligned}$$

Пусть $\bar{t} = P_{11} \cdot B$, где $B = \bar{t}_1 \cdot \frac{1 - p_{4,11} p_{11,4}}{p_{12} p_{24} p_{4,11}} + \bar{t}_2 \cdot \frac{1 - p_{4,11} p_{11,4}}{p_{24} p_{4,11}} + \bar{t}_3 \cdot \frac{(1 - p_{4,11} p_{11,4}) p_{13}}{p_{12} p_{24} p_{4,11}} +$
 $+ \bar{t}_4 \cdot \frac{1}{p_{4,11}} + \bar{t}_5 \cdot \frac{(1 - p_{4,11} p_{11,4}) p_{13} p_{35}}{p_{12} p_{24} p_{4,11}} + \bar{t}_6 \cdot \frac{(1 - p_{4,11} p_{11,4}) p_{13} p_{36}}{p_{12} p_{24} p_{4,11}} + \bar{t}_7 \cdot \frac{(1 - p_{4,11} p_{11,4}) p_{13} p_{37}}{p_{12} p_{24} p_{4,11}} +$
 $+ \bar{t}_8 \cdot \frac{p_{48}}{p_{4,11}} + \bar{t}_9 \cdot \frac{p_{49}}{p_{4,11}} + \bar{t}_{10} \cdot \frac{p_{4,10}}{p_{4,11}} + \bar{t}_{11}.$

С учетом $\pi_i = \frac{P_i \bar{t}_i}{\bar{t}}$ найдем выражения для определения вероятностей исследуемых процессов:

$$\begin{aligned} \pi_1 = \frac{P_1 \bar{t}_1}{\bar{t}} = \frac{P_1 \bar{t}_1}{P_{11} B} = \frac{1 - p_{4,11} p_{11,4}}{p_{12} p_{24} p_{4,11} B} \cdot \bar{t}_1; \quad \pi_2 = \frac{P_2 \bar{t}_2}{\bar{t}} = \frac{P_2 \bar{t}_2}{P_{11} B} = \frac{1 - p_{4,11} p_{11,4}}{p_{24} p_{4,11} B} \cdot \bar{t}_2; \\ \pi_3 = \frac{P_3 \bar{t}_3}{\bar{t}} = \frac{P_3 \bar{t}_3}{P_{11} B} = \frac{(1 - p_{4,11} p_{11,4}) p_{13} \bar{t}_3}{p_{12} p_{24} p_{4,11} B}; \quad \pi_4 = \frac{P_4 \bar{t}_4}{\bar{t}} = \frac{P_4 \bar{t}_4}{P_{11} B} = \frac{\bar{t}_4}{p_{4,11} B}; \\ \pi_5 = \frac{P_5 \bar{t}_5}{\bar{t}} = \frac{P_5 \bar{t}_5}{P_{11} B} = \frac{(1 - p_{4,11} p_{11,4}) p_{13} p_{35} \bar{t}_5}{p_{12} p_{24} p_{4,11} B}; \quad \pi_6 = \frac{P_6 \bar{t}_6}{\bar{t}} = \frac{P_6 \bar{t}_6}{P_{11} B} = \frac{(1 - p_{4,11} p_{11,4}) p_{13} p_{36} \bar{t}_6}{p_{12} p_{24} p_{4,11} B}; \\ \pi_7 = \frac{P_7 \bar{t}_7}{\bar{t}} = \frac{P_7 \bar{t}_7}{P_{11} B} = \frac{(1 - p_{4,11} p_{11,4}) p_{13} p_{37} \bar{t}_7}{p_{12} p_{24} p_{4,11} B}; \quad \pi_8 = \frac{P_8 \bar{t}_8}{\bar{t}} = \frac{P_8 \bar{t}_8}{P_{11} B} = \frac{p_{48} \bar{t}_8}{B}; \quad \pi_9 = \frac{P_9 \bar{t}_9}{\bar{t}} = \frac{P_9 \bar{t}_9}{P_{11} B} = \frac{p_{49} \bar{t}_9}{B}; \\ \pi_{10} = \frac{P_{10} \bar{t}_{10}}{\bar{t}} = \frac{P_{10} \bar{t}_{10}}{P_{11} B} = \frac{p_{4,10} \bar{t}_{10}}{B}; \quad \pi_{11} = \frac{P_{11} \bar{t}_{11}}{\bar{t}} = \frac{P_{11} \bar{t}_{11}}{P_{11} B} = \frac{\bar{t}_{11}}{B}; \end{aligned}$$

Здесь π_1 – вероятность застать ТС работоспособной и не находящейся на обслуживании/восстановлении в любой произвольный момент времени.

Полученные зависимости позволяют определить вероятностные и временные характеристики системы поддержания в готовности ТС. Вероятность нахождения в работоспособном состоянии 1 в данном случае является коэффициентом готовности, может быть использована в качестве показателя результативности системы поддержания в готовности ТС:

$$\pi_1 = K_{\Gamma} = f(\lambda, \mu_{\text{пр}}, \mu_{\text{ср}}, \mu_{\text{кр}}, T_{\text{пр}}, t_{\text{пр}}^1, t_{\text{пр}}^{\text{TP}}, t_{\text{B}}^{\text{CP}}, t_{\text{B}}^{\text{KP}}, t_{\text{пр}}^{\text{II}}, t_{\text{ГО}}, t_{\text{II}}^{\text{CP}}, t_{\text{II}}^{\text{KP}}).$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Условное разделение системы эксплуатации ТС на штатную и нештатную эксплуатации и распределение мероприятий по восстановлению и поддержанию работоспособности на работы выполняемые силами и средствами эксплуатирующей организации, старшего начальника и предприятий промышленности, позволит решить поставленную задачу.

С помощью предложенного авторами подхода представляется возможным решение задачи комплексного обоснования требований к основным характеристикам системы поддержания в

готовности изделий военной техники, выбрав ее вариант с тем набором указанных параметров, который обеспечивает требуемое значение коэффициента готовности K_T .

Задав требования по временным характеристикам к элементам (обслуживающий персонал, ремонтные органы старшего начальника, предприятия промышленности) системы поддержания в готовности ТС, распределим работы по поддержанию в готовности между исполнителями данных работ в соответствии с [7] с учетом ограничений по стоимости. А также распределим персонал для выполнения работ с учетом его квалификации по данным статьи [8].

Таким образом, обоснованы временные и вероятностные характеристики по поддержанию в готовности ТС элементов системы ТехОб, оптимально распределены работы между ними, сформированы их организационные структуры.

Список используемых источников

1. *Сычев Е.И.* Метрологическое обеспечение радиоэлектронной аппаратуры. – М.: РИЦ «Татьянин день», 1993. – 277 с.
2. *Мищенко В.И.* Эволюция моделей процесса эксплуатации вооружения и военной техники // Вестник академии военных наук. – 2003. – № 4(05)/200. – С. 75–83.
3. *Дьяков А.Н., Решетников Д.В., Бояришинов С.Н.* Моделирование системы поддержания работоспособного состояния сложных технических систем // Вооружение и экономика. – 2016. – № 3(36)/97. – С. 35–44.
4. ГОСТ Р 27.004. – 2009. Надежность в технике. Модели отказов / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – Введ. 09.01.2010. – М.: Стандартинформ, 2010. – 16 с.
5. *Половко А.М., Гуров С.В.* Основы теории надежности. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.
6. *Волков Л.И.* Управление эксплуатацией летательных комплексов: учеб. пособие для военных вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1987. – 400 с.
7. *Калмыков Е.В.* Подход к разработке модели подсистемы поддержания в готовности электромеханического оборудования объектов КВ // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 667. – С. 320 – 326.
8. *Гера В.И., Мосягин Р.А., Калмыков Е.В.* К вопросу о формировании оптимального состава расчетов поддержания в готовности энергомеханического оборудования // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 660. – С. 153–160.

В.О. Головчинский;
В.В. Козлов,
доктор техн. наук, профессор;
А.В. Лагун,
кандидат техн. наук, доцент

КООРДИНИРОВАНИЕ РЕСУРСОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ СРЕДИ ЭЛЕМЕНТОВ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА В ЗАДАЧАХ АНАЛИЗА НЕШТАТНЫХ СИТУАЦИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ЕГО ЭКСПЛУАТАЦИИ

Представлены результаты исследования по координации ресурсораспределения в структуре ракетно-космического комплекса при условии улучшения качества его жизненного цикла. Определены показатели ресурсораспределения на основе семантического подхода к формированию показателя эффективности процессов функционирования ракетно-космических комплексов. Итоги представленной процедуры координации работы системы ресурсораспределения с использованием принципа оценки взаимодействия позволили показать снижение затрат на функционирование ракетно-космического комплекса.

Ключевые слова: ракетно-космические комплексы, структурный элемент, ресурсораспределение, жизненный цикл, нештатная ситуация, показатель, координирующие процессы.

ВВЕДЕНИЕ

При эксплуатации сложных динамических систем, таких, например, как различного типа ракетно-космические комплексы, технический руководитель проведения тех или иных операций сталкивается с ситуацией, когда фактические и соответствующие им измеренные значения технических и эксплуатационных характеристик системы и окружающей среды превышают допустимые пределы. В этом случае малый диапазон времени на принятие решения повышает требования к качеству оперативной информации и быстродействию управляющих и анализирующих звеньев и устройств.

Достаточная полнота и точность оперативной информации о возникшей нештатной ситуации (НШС) и возможных последствиях являются необходимым условием принятия ответственного решения на продолжение операции.

В указанных условиях технический руководитель должен иметь научно обоснованные рекомендации по следующим вопросам:

- возможного характера поведения динамической системы;
- безопасности функционирования экипажа;
- безопасности населения;
- возможных экологических последствий управленческих решений;
- надежности достижения цели операции.

По сути, оперативно необходимо решить задачу анализа получаемых с учетом НШС траекторий движения динамической системы, оценить последствия операции и выработать необходимые управленческие решения. При этом, если имеется возможность устранения причины возникновения НШС путем приостановления или отмены выполнения динамической операции, то эти действия необходимо выполнить. Если такой возможности нет, предлагается следующий подход. Предположим, что имеется состав кортежа анализируемых (контролируемых) характеристик динамической системы и окружающей среды p . Будем полагать, что $p^* = p$, где p^* – кортеж измеренных значений технических и эксплуатационных характеристик системы и окружающей среды. Часто параметры этого кортежа, например боковой ветер, повышенный расход топлива, превышение начальной массы системы и про-

чие, малоинформативные. Для анализа сложившейся НШС предлагается подготовить путем моделирования другой, более информативный кортеж данных d , который бы позволил принять квалифицированное управленческое решение на проведение операции.

В состав кортежа данных, достаточных для анализа НШС в условиях отклонений элементов кортежа p , необходимо вводить ключевые показатели. К их числу можно отнести:

- вероятность достижения цели операции;
- затраты операционных ресурсов (в том числе и времени);
- риск функционирования экипажа (если таковой имеется);
- риск нанесения ущерба населению и окружающей среде;
- ущерб от отказа выполнения операции.

При этом пусть математическая модель, описывающая поведение динамической системы, содержит дифференциальные уравнения следующего вида:

$$\dot{\bar{x}}(t) = \bar{\phi}(\bar{x}, \bar{u}, p^*, t), \quad (1)$$

где \bar{x} – фазовый вектор, $\bar{x} \in X$ (X – множество допустимых значений \bar{x});

$p_i^* \notin P$ (P – множество допустимых измеренных значений p^* , i – номера анализируемых (контролируемых) параметров кортежа, вышедших за допуски);

$\bar{\phi}$ – вектор правых частей дифференциальных уравнений, описывающих поведение динамической системы;

\bar{u} – вектор управлений, $\bar{u} \in U$;

t_k – текущее время, $t \in [t_0, t_k]$.

Тогда задача оценивания возможности выполнения операции при заданном малоинформативном кортеже P связана с необходимостью поиска такого кортежа данных $d = d(\bar{x})$, который позволит принять квалифицированное решение на выполнение операции. Поиск информативных данных при возникновении НШС близок по содержанию к задаче обоснования характеристик функционирования динамической системы, которую решают при ее проектировании. Основной особенностью решения такой задачи для условий подготовки и проведения операции является ограниченное время. Поэтому в состав кортежа данных d , достаточных для анализа возможностей проведения операции в условиях отклонений измеренных элементов кортежа p^* , и необходимо вводить только ключевые показатели. В этом случае математическая постановка задачи подготовки кортежа данных на выполнение операции может быть сформулирована следующим образом. На дифференциальных связях (1) среди всех допустимых управлений $\bar{u} \in U$, переводящих динамическую систему из начального положения \bar{x}_0 в конечное положение \bar{x}_k найти такое, при котором будет выполняться условие $d \in D$ (D – область допустимых значений кортежа d) и показатель результативности выполнения целевой задачи примет экстремальное значение, т.е.

$$\Phi(\bar{x}, \bar{u}, p, t_k) \rightarrow \max_{\substack{\bar{x} \in X, \bar{u} \in U \\ d \in D}}. \quad (2)$$

Сформулированная задача относится к классу задач оптимального управления движением динамической системой с ограничениями на параметры управления и фазовые координаты в промежуточных точках траектории. Методы ее решения известны [1, 2].

Полученное решение позволяет перейти от анализа малоинформативного кортежа данных p к кортежу данных d , обладающему достаточной информативностью для принятия решения о выполнении операции, ее переносе или отмене.

СЕМАНТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ФОРМИРОВАНИЮ СИСТЕМЫ ОЦЕНИВАНИЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ РЕСУРСОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Остановимся на вопросах оценивания ракетно-космических комплексов (РКК) в процессе их эксплуатации. Процесс оценивания можно применять как к уже созданным РКК, так и к тем, которые только создаются на уровне формирования их облика. В данной публикации проблемы оценивания мы будем рассматривать с позиций создания новых технических систем. Вообще, всякие научные исследования следует начинать с семантики, поскольку не однозначные трактовки явлений и объектов, принятые в начале рассуждений, могут привести к большим сложностям при обсуждении результатов работы.

В понятие качества технического объекта входят две важные составляющие: качество процесса функционирования объекта и качество объекта как предмета (рис. 1).

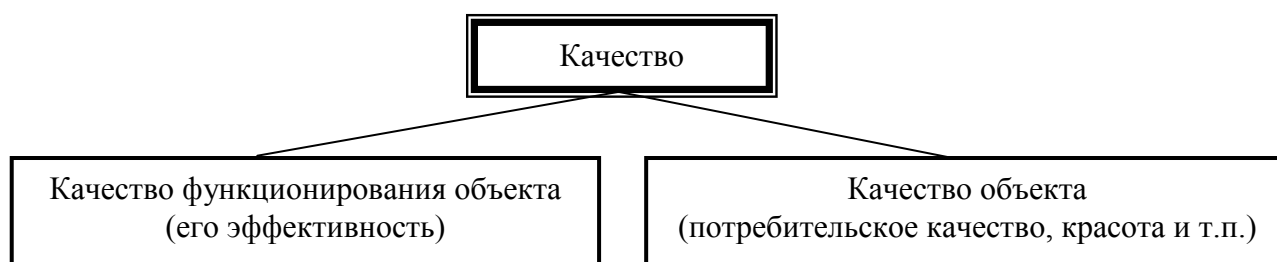


Рис. 1. Структура качества

Сегодня не представляется возможным найти объективный способ оценивания, например, красоты объекта. Поэтому в дальнейшем будет рассматриваться аспект качества реализуемых целенаправленных процессов объекта.

Исходя из этого, для формирования полного множества достаточно общих свойств (показателей) РКК или его целенаправленных систем предлагается искать решение, отталкиваясь от понятия системы. Иными словами, формируя РКК, следует описать его элементы и связи между ними. И те и другие должны обладать показателями. Целевой подход к формированию РКК позволяет предположить наличие для его свойств некой иерархии.

На верхнем уровне такой иерархии должно стоять качество, отражающее эффективность системы, как интегральное сложное свойство. На нижних уровнях, в соответствии с общесистемным принципом останова, должны находиться качества явлений, которые определяют свойства конструктивных материалов, из которых создается система и в результате деградации которых меняются свойства системы в целом.

Полагаем, что для РКК может быть построена иерархия его свойств (и соответственно иерархия показателей), такая модель показана на рис. 2. Из рисунка видно, что в этой модели РКК не все уровни иерархии разработаны достаточно подробно. Так, нижние уровни иерархии, исследуемые еще Демокритом и далее Д. Гиббсом, Планком, Шенноном, Гейзенбергом, Джейнсом, Больцманом, Массье, Гельмгольцом, Максвеллом, Кельвиным, Клаузиусом и др. [1–7] привели к появлению обобщенных свойств и показателей, таких как температура, давление, энтропия и прочие термостатические и термодинамические параметры. Однако термодинамический (энтропийный) подход, являясь по существу энергетическим, приводит к потере времени, одного из важнейших параметров, через который определяются многие другие значимые параметры, такие как скорость, ускорение, частота и т.д.

В результате для описания РКК «искусственно» назначаются и вводятся такие параметры как виброскорость, виброперемещение (ИСО 2372-74, ГОСТ ИСО 10816-1-97).

Верхняя часть иерархии свойств РКК исследовалась с позиций теории эффективности, системотехники, теории систем и прочих научных направлений.

Первая задача для описания целенаправленной системы на верхнем системном уровне сводится к тому, что следует научиться распознавать «состояние» достижения цели. Если формализация целенаправленного поведения вообще возможна, то она неизбежно приводит к описанию общей ситуации принятия решений, поэтому формализованная целенаправленность ведет к тем же понятиям, что и общая теория принятия решений.

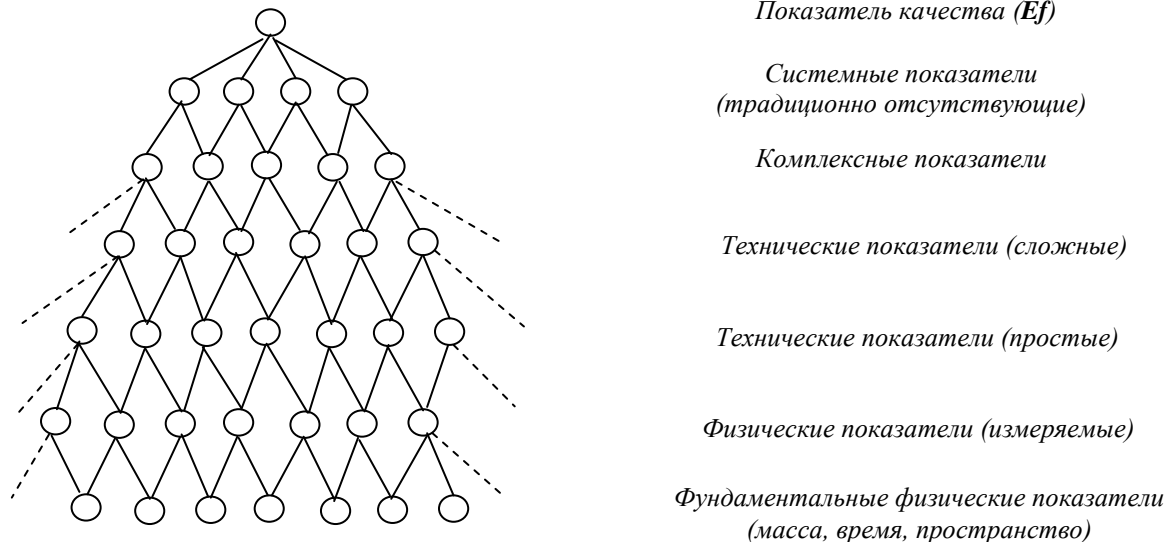


Рис. 2. Иерархическая модель свойств сложной технической системы

Формализованная цель определяется некоторой задачей принятия решений, а достижение цели означает, что соответствующая задача принятия решений выполнена.

Исходя из этих предпосылок, следует ввести некоторые предварительные понятия.

Общей системой принято называть отношение на абстрактных множествах:

$$S \subset \times \{V_i : i \in I\},$$

где X – символ декартова произведения;

I – множество индексов.

Множество V_i в нашей задаче будем называть свойством системы.

Множество индексов образуют множество входных индексов $I_x \subset I$ и множество выходных индексов $I_y \subset I$.

Тогда множество вида

$$X = \times \{V_i : i \in I_x\}$$

можно назвать внешними свойствами системы, а множество

$$Y = \times \{V_i : i \in I_y\}$$

можно назвать целевыми свойствами системы.

Система S определяется отношением

$$S \subset X \times Y.$$

Для случая целенаправленной системы система описывается не прямо, а с помощью некоторой задачи принятия решений.

По сути дела систему

$$S \subseteq X \times Y$$

определяют, требуя, чтобы пара (x, y) принадлежала S тогда и только тогда, когда y является решением задачи принятия решений, задаваемых элементом x .

В наших рассуждениях X – пока произвольное множество пусть даже известных свойств, однако действия целенаправленной системы неизбежно наткнутся на некие неопределенные явления и процессы.

Для их описания введем множество неопределенности (возмущений), которые обозначим Ω .

Для получения результата действий целенаправленной системы следует ввести функцию качества Ef (оценочную функцию или в привычных технических терминах функцию эффективности), а также целевую функцию g (в смысле оптимизации процесса достижения цели).

Нередко функцию g определяют с помощью функции объекта управления P , т.е. функции, описывающей функционирование целенаправленной системы и оценочной функции Ef .

Тогда

$$P: X \rightarrow Y \quad \text{и} \quad Ef: X \times Y \rightarrow V \\ g(x) = Ef(x, P(x))$$

или с учетом возможных (неминуемых) возмущений ω из Ω

$$g(x, \omega) = Ef(x, \omega, P(x, \omega)).$$

Целенаправленная техническая система создается для реализации процесса эксплуатации, протекающего в пространстве состояний этой системы. Если процесс – это ход, развитие какого-нибудь явления, последовательная смена состояний в развитии чего-нибудь, то его можно описывать исключительно с помощью функции перехода состояний.

Процесс достижения цели можно интерпретировать как так называемую проблему устойчивости за конечное время, т.е. проблему достижимости устойчивого состояния за конечное время. Здесь мы понимаем под состоянием системы характеристику системы на данный момент ее функционирования.

Поскольку целенаправленные системы создаются для выполнения какого-либо действия, то для них вполне приемлемо определение динамических систем.

Для таких систем ($S \subset X \times Y$) всегда найдутся два таких семейства отображений:

$$\bar{\rho} = \{\rho_t: C_t \times X_t \rightarrow Y_t \& t \in T\} \quad \text{и} \quad \bar{\phi} = \{\phi_{t'}: C_t \times X_{t'} \rightarrow C_t \& t, t' \in T \& t' > t\},$$

где $\bar{\phi}$ – семейство функций переходов состояния системы;

$\bar{\rho}$ – семейство функций реакции системы;

C – множество глобальных состояний системы (пространство состояний системы).

Если систему представить с помощью некой начальной реакции ρ_0 , то эта функция чаще всего является функцией большой мощности. Поэтому для эффективного способа описания результирующего свойства системы необходимо найти более простые функции, по возможности меньшей мощности, с помощью которых тем не менее можно охарактеризовать поведение системы. Такие функции будут вспомогательными.

Чтобы получить значения показателя качества системы, должна быть задана функция, определяющая значение этого показателя. То есть для любых заданных x^t и C_0 необходимо найти $y(t)$.

Для определения такой функции (производящей значение качества системы) можно использовать выражение

$$\mu_{t'}: C_t \times \bar{X}_{t'} \rightarrow Y(t'),$$

которое используется в теории эффективности для введения понятия эффективности (E) технической системы и для введения ее показателя:

$$Ef: E \rightarrow \mathbb{R}^1.$$

Предполагая, что эффективности РКК является наиболее общим и информативным свойством, следует больше внимания уделить семантике этого свойства.

Так как космодром рассматривается как иерархическая структура, основными объектами которой являются РКК, то для оценивания качества процессов функционирования космодрома применима процедура свертки показателей эффективности процессов функционирования его

РКК. Все рассмотренные показатели имеют конкретное физическое или стоимостное содержание, либо отражают результаты экспертных и других исследований о качестве системы (нечеткие показатели). Для получения структуры системы оценивания в работе предложено вводить фрактальные структуры, связывающие показатели свойств процессов функционирования космодрома. Таким образом, появляется возможность свернуть пространство компонентов вектора качества процессов функционирования космодрома в виде $\langle A, R, T, I \rangle$ к неподвижной точке (фрактальному аттрактору), а затем развернуть ее во фрактальную иерархическую структуру для компонентов показателя качества функционирования комплекса.

Для определения количества таких компонентов использовалось размещение следующего вида:

$$A_r^k = A(a_r^k) = \frac{k!}{(k-r)!},$$

где A_r^k – число различных размещений (размещение a_r^k из k элементов по r).

Таким образом, число компонентов показателя качества процессов функционирования космодрома соответствует: комбинации первоначальных компонентов по «три» вершины $A_r^k = 24$; комбинации первоначальных компонентов по «две» вершины исходного вектора $A_r^k = 144$; комбинации первоначальных компонентов по «одной» вершине $A_r^k = 288$ или количество свойств показателя качества процессов функционирования космодрома должно состоять из $24+144+288=456$ свойств, размещенных в шестиугольной фрактальной (самоподобной) иерархической структуре предложенной системы оценивания. Самоподобие (фрактальность) иерархической структуры свойств показателя качества процессов функционирования космодрома, построенное на вложенных фрактальных структурах, предполагает размещение в его вершинах комбинации троек исходного вектора $\langle A, R, T, I \rangle$. Иными словами, векторов типа $\langle A, R, T \rangle, \langle A, R, I \rangle, \langle A, I, T \rangle$ и т.д. На последующем уровне иерархии, также построенном на фрактальных структурах, расположены «двойки» векторов типа $\langle A, R \rangle, \langle R, I \rangle, \langle A, T \rangle$ и т.д. На более низких уровнях иерархической системы оценивания свойств показателя качества процессов функционирования космодрома, а также в вершинах идентичных фрактальных структур расположены единичные вектора $\langle A \rangle, \langle R \rangle, \langle T \rangle$ и т.д.

В работе к таким свойствам, оценивающим процессы функционирования космодрома, отнесены: устойчивость, управляемость, безопасность, действенность, способность и адаптивность (рис. 3).

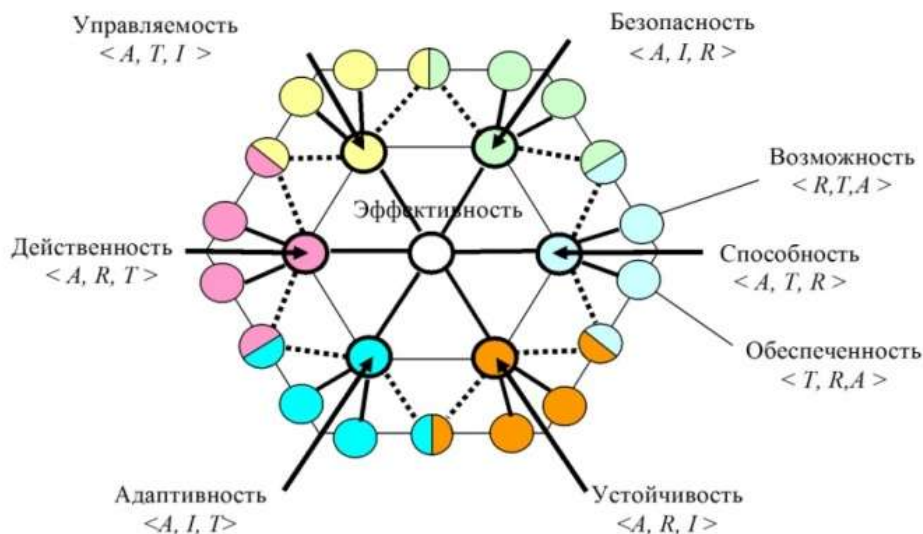


Рис. 3. Схема свойств, оценивающих процессы функционирования космодрома

В результате была разработана методика определения критериев и показателей эффективности процессов эксплуатации ракетно-космических комплексов, в том числе и в нестандартных ситуациях, представленная на рис. 4

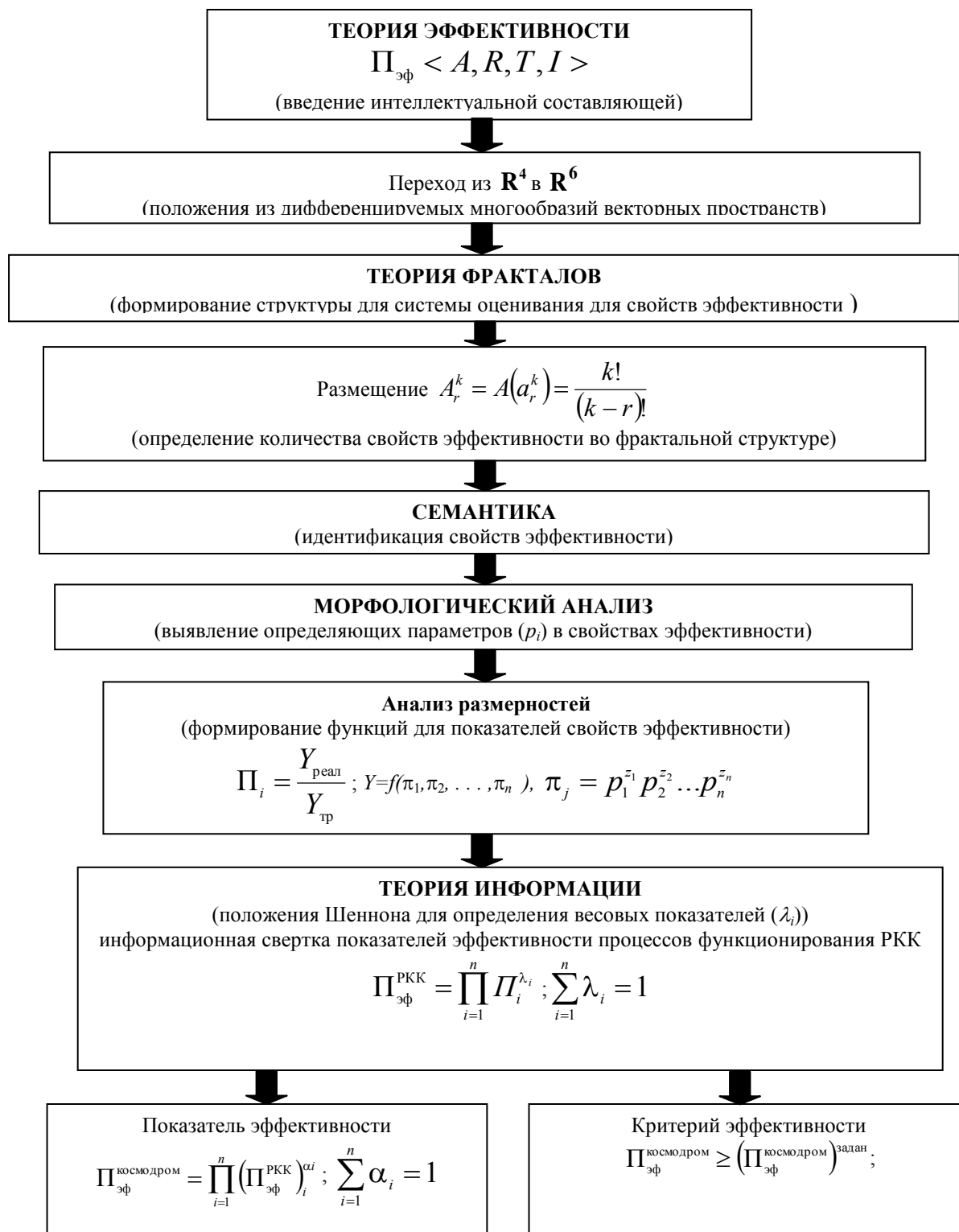


Рис. 4. Методика определения критериев и показателей эффективности процессов эксплуатации ракетно-космических комплексов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, процедуры оценивания эффективности процессов функционирования РКК следует начинать с семантических особенностей общих и технических свойств комплексов. На основании семантического анализа удастся сформировать расширенное упорядоченное множество свойств, что приводит к возможности более полного и объективного оценивания процессов эксплуатации комплекса.

Достаточная полнота и точность информации по оцениванию процессов эксплуатации РКК, особенно для условий нештатных ситуаций, и возможных последствий является необходимым условием принятия ответственного решения на продолжение операций.

Использованные в статье методологические положения для построения математического аппарата, оценивающего качество процессов функционирования космодрома, позволили спланировать координирование ресурсораспределения среди элементов ракетно-космического комплекса как структурного элемента космодрома в задачах анализа ситуаций, возникающих при его эксплуатации.

Список используемых источников

1. Месарович М., Мако Д., Такахара И.М. Теория иерархических многоуровневых систем. – М.: Мир, 1978. – 311 с.
2. Козлов В.В. Аверкиев Н.Ф., Мокан Д.О. Иерархическая структура показателей РКК в интересах обеспечения национальной безопасности // Высокие интеллектуальные технологии и инновации в национальных исследовательских университетах: материалы Международной научно-исследовательской конференции. 9–10 февраля 2012 г., СПб. – СПб., 2012. – Т.5: Стратегия будущего. – С. 251–254.
3. Резников Б.А. Системный анализ и методы системотехники: учебник. – МО РФ 1990. – 522 с
4. Федоров А.В. Обеспечение безопасности процесса функционирования стартового комплекса при возникновении нештатных ситуаций. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2004. – 136 с.
5. Петухов Г.Б. Теоретические основы и методы исследования эффективности оперативных целенаправленных процессов: учеб. пособие. – Л.: ВИКИ им. А.Ф. Можайского, 1979. – 176 с
6. Рябинин И.А., Черкесов Г.Н. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем. – М.: Радио и связь, 1981. – 264 с.
7. Управление, информация, интеллект / А.И. Берг, Б.В. Бирюкова, Е.С. Геллера и др. – М.: Мысль, 1976. – 182 с.

И.О. Голиков,
кандидат техн. наук;
В.А. Давидчук;
А.В. Лагун,
кандидат техн. наук, доцент;
Д.В. Садин,
доктор техн. наук, профессор

МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕНЕРАТОРОВ ЗАГРАДИТЕЛЬНЫХ ДИСПЕРСНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ФАКТОРОВ РАЗЛИЧНОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ

Предложена методика обоснования генераторов заградительных дисперсных образований от воздействия факторов различной физической природы, которая включает математическую модель двухскоростной динамики двухфазных сред и модифицированный метод расчета второго порядка точности по пространству и времени. Достоверность методики подтверждена сопоставлением расчетных и экспериментальных результатов. Исследован процесс выброса газодисперсной среды из канала с различными коэффициентами загрузки. Выполнена оценка интегральных характеристик заградительных дисперсных образований, таких как суммарный скоростной напор и распределение погонной массы в осевом и радиальном направлениях.

Ключевые слова: методика обоснования, заградительные дисперсные образования

ВВЕДЕНИЕ

Групповые объекты ракетно-космической техники могут подвергаться воздействию различных видов техногенных и природных поражающих факторов, к которым относятся ударно-волновое, тепловое, а также механическое воздействия тел различных габаритных размеров. В настоящее время рассматриваются новые методы и средства защиты групповых объектов от воздействия различных видов факторов различной физической природы, которые должны обладать следующими свойствами. Высокой диссипативностью средств защиты, которая обеспечивает возможность интенсивного поглощения динамических и энергетических воздействий. Активностью и управляемостью за счет разворачивания заградительных экранов в заданных областях пространства с требуемыми геометрическими, временными и физическими характеристиками на период воздействия поражающих факторов.

Сущность предлагаемых методов и средств защиты заключается в расположении между источником опасности и элементами группового объекта заградительного дисперсного образования, что позволяет маскировать и защищать от теплового и ударно-волнового воздействий, отклонять низколетящие объекты различных габаритных размеров за счет импульсного создания потока плотных частиц с интенсивным скоростным напором [1–3].

Вопросы разлета газодисперсной среды рассматривались в работах [4–14]. В предыдущих исследованиях изучаются, как правило, одномерные движения равновесной и неравновесной газовзвеси [6–9, 14]. Авторами [7] исследована динамика разлета цилиндрических объемов гетерогенных металлизированных сред в рамках равновесной постановки задачи. Пространственные выбросы неравновесных двухфазных сред из цилиндрических каналов при полном их заполнении изучены в [10–13]. Процессы истечения и эволюции газодисперсной среды под избыточным давлением газа при частичном заполнении генератора требуют дополнительного исследования.

Целью работы является определение целесообразности и обоснования рациональных путей использования новых физических принципов и технических решений при разработке

перспективных образцов генераторов заградительных дисперсных образований от воздействия факторов различной физической природы. Предлагаемая методика включает математическую модель динамики дисперсного образования и метод расчета.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ДИСПЕРСНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

Для описания движения газа и частиц заградительного дисперсного образования используем систему уравнений двухскоростной динамики двухфазных сред [15, 16]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} + \nabla_d \mathbf{G} + \mathbf{B}(\nabla_d \mathbf{F}) &= \mathbf{H}(\mathbf{q}), \\ \mathbf{q} &= [\rho_1, \rho_2, \rho_1 \mathbf{v}_1, \rho_2 \mathbf{v}_2, \rho_2 e_2, \rho_1 E_1 + \rho_2 K_2]^T, \\ \mathbf{G} &= [\rho_1 \mathbf{v}_1, \rho_2 \mathbf{v}_2, \rho_1 \mathbf{v}_1 \mathbf{v}_1, \rho_2 \mathbf{v}_2 \mathbf{v}_2, \rho_2 e_2 \mathbf{v}_2, \rho_1 E_1 \mathbf{v}_1 + \rho_2 K_2 \mathbf{v}_2]^T, \\ \mathbf{F} &= [0, 0, p, p, 0, p(\alpha_1 \mathbf{v}_1 + \alpha_2 \mathbf{v}_2)]^T, \\ \mathbf{H} &= [0, 0, -\mathbf{F}_\mu + \rho_1 \mathbf{g}, \mathbf{F}_\mu + \rho_2 \mathbf{g}, Q_T, -Q_T + \rho_1 \mathbf{g} \cdot \mathbf{v}_1 + \rho_2 \mathbf{g} \cdot \mathbf{v}_2]^T, \\ \nabla_d &= \text{diag}(\nabla, \nabla, \nabla, \nabla, \nabla, \nabla), \quad \mathbf{B} = \text{diag}[1, 1, \alpha_1, \alpha_2, 1, 1], \\ \rho_i &= \rho_i^\circ \alpha_i \quad (i=1, 2), \quad \alpha_1 + \alpha_2 = 1, \quad E_1 = e_1 + v_1^2 / 2, \quad K_2 = v_2^2 / 2, \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь и далее индексы 1 и 2 внизу относятся соответственно к параметрам несущей и дисперсной фаз, индекс $^\circ$ сверху относится к истинным значениям плотности; ∇ – оператор Гамильтона. Через $\alpha_i, \rho_i, \mathbf{v}_i, E_i, e_i, p, \mathbf{g}$ обозначены объемная доля, приведенная плотность, вектор скорости, полная и внутренняя энергии единицы массы i -й фазы, давление газа, вектор ускорения свободного падения соответственно; \mathbf{F}_μ, Q_T – соответственно вязкая составляющая силы межфазного взаимодействия, мощность теплообмена между газом и частицами в единице объема; t – время.

Для замыкания системы (1) используем уравнения состояния идеального калорически совершенного газа и несжимаемых твердых частиц: $p = (\gamma_1 - 1)\rho_1^\circ e_1, \quad e_1 = c_v T_1, \quad e_2 = c_2 T_2, \quad \{\gamma_1, c_v, c_2, \rho_2^\circ\} \equiv \text{const}$, где T_1, T_2 – температура несущей фазы и частиц; γ_1, c_v – показатель адиабаты и удельная теплоемкость газа при постоянном объеме; c_2 – удельная теплоемкость частиц. Интенсивности межфазного трения и теплообмена \mathbf{F}_μ, Q_T задаются на основе экспериментально подтвержденных для рассматриваемого класса задач эмпирических критериальных соотношений [15].

Начальные условия заданы: в емкости генератора – термодинамические параметры фаз в состоянии покоя, в окружающей атмосфере – нормальные атмосферные условия. Граничные условия: на стенках – отражения, на внешних границах – экстраполяции.

МЕТОД РАСЧЕТА И ЕГО ВЕРИФИКАЦИЯ

Для расчета используем гибридный метод крупных частиц на основе схемы с настраиваемыми диссипативными свойствами CDP2 (Customizable Dissipative Properties) [16, 17] в конечно-объемной реализации [18] со вторым порядком точности по пространству и времени. Для обеспечения высокой устойчивости вычислительного алгоритма силовое и тепловое взаимодействия $\mathbf{H}(\mathbf{q}^{k+1})$ берутся с верхнего временного слоя t^{k+1} и рассчитываются по безытерационной схеме [19, 20].

Для подтверждения достоверности методики расчета сравним численные результаты с экспериментальными данными. В качестве выбросного генератора использовался цилиндрический канал длиной $L=1,5$ м и диаметром $D=0,1$ м, который заполнялся кварцевым песком с характерным размером частиц $d=100$ мкм в насыпном состоянии с пористостью $\alpha_{10}=0,5$. Вертикально закрепленный канал под избыточным давлением воздуха $\Delta p_0=1,8$ МПа был отделен от окружающей среды мембраной. В момент времени $t=0$ мембрана принудительно прорывалась, и воздушно-песчаная смесь истекала в атмосферу. Процесс выброса фиксировался на видеокамеру с частотой 25 кадров в секунду. На рис. 1 представлены экспериментальные кадры (справа от оси симметрии) и теневая визуализация расчета (слева) для двух последовательных моментов времени: 40 и 80 мс.

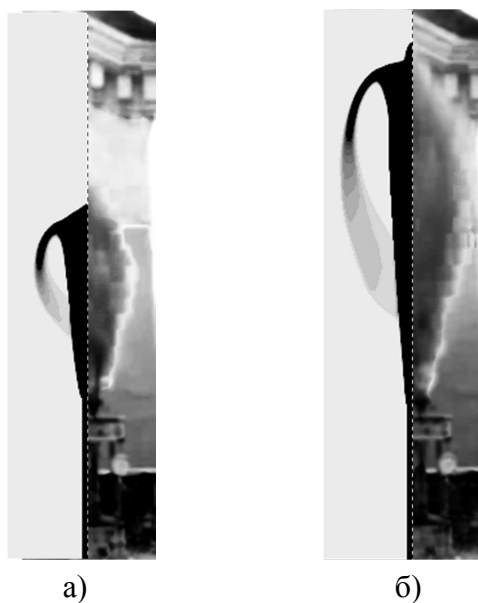


Рис. 1. Сравнение расчетных и экспериментальных данных выброса песчано-воздушной смеси для последовательных моментов времени: а – 40 мс; б – 80 мс

Расчеты показывают, что газодисперсное образование состоит из плотного достаточно узкого ядра и цилиндрического вихря по периферии. Внешние контуры и характерные размеры струи, полученные численно, согласуются с опытными данными. Небольшие расхождения объясняются тем, что в эксперименте песок имел многофракционный состав с частицами различных размеров в отличие от математической модели для твердой фазы в виде монодисперсных шаров заданного диаметра.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИКИ

Рассмотрим вертикальный выброс смеси твердых частиц с газом повышенного давления для случая, когда порошок частично заполняет цилиндрический канал с параметром загрузки $\varepsilon = L_1 / L$ (рис. 2). Задача решается в двумерной осесимметричной постановке на ортогональной равномерной сетке с шагом $h=0,01$ м. В начальный момент времени смесь сферических частиц плотностью $\rho_2^0 = 2600$ кг/м³, диаметром $d=100$ мкм с объемной долей $\alpha_{20}=0,5$ и воздуха под давлением газа $p_0=1$ МПа заполняют канал длиной $L=0,6$ м и диаметром

$D = 0,2$ м с параметром загрузки $\varepsilon = 1/3$. Для заданной геометрии генератора начальная масса дисперсной среды составляет $M_0 = 8,17$ кг.

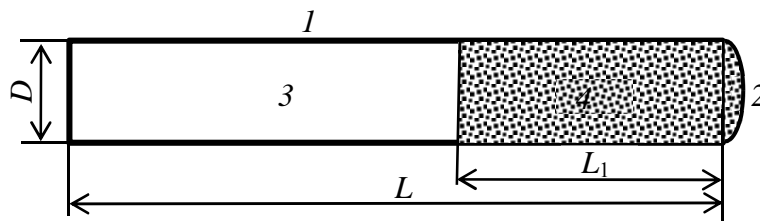


Рис. 2. Схема выбросного генератора:

1 – цилиндрический канал; 2 – прорывная мембрана; 3 – газовый отсек;
4 – отсек с газодисперсной средой; D – диаметр канала; L – длина канала;
 L_1 – длина загрузочного отсека

После прорыва мембраны происходит распад произвольного разрыва: в глубь канала распространяется волна разрежения, а в противоположном направлении истекает двухфазная среда. До взаимодействия волны разрежения с границей сред, разделяющей отсеки газа высокого давления 3 и смеси 4 (рис. 2), выброс порошка не отличается от случая полной загрузки генератора $\varepsilon = 1$. В последующие моменты времени, после выхода границы раздела сред из канала, происходит резкое ускорение потока воздуха и сжатие слоя порошка. Вследствие несовпадения градиентов плотности и давления на его левой границе развивается неустойчивость (аналогичная по физическому механизму неустойчивости Рихтмайера-Мешкова) с образованием интенсивного вихревого движения (рис. 3).

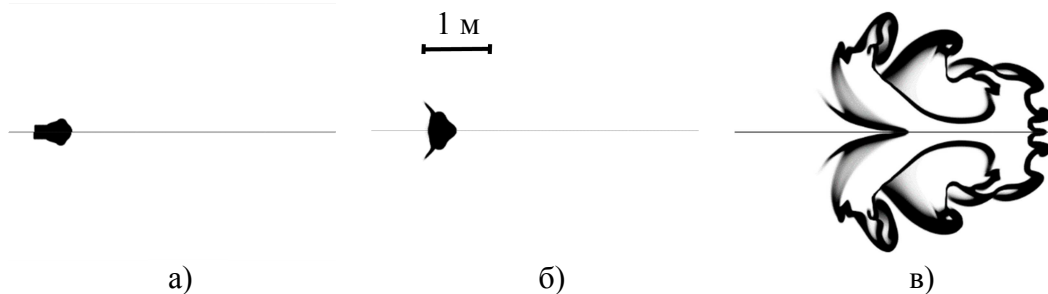


Рис. 3. Теневая визуализация выброса газодисперсной среды для последовательных моментов времени:

а – 10 мс; б – 20 мс; в – 130 мс

В дальнейшем дисперсное образование увеличивается в объеме с характерным размером более 10 м и временным масштабом порядка 10 сек. с уменьшением скорости, интенсивности вихрей и последующим оседанием. Для создания заградительного дисперсного экрана большего объема целесообразно применение совокупности генераторов. Например, чтобы прикрыть направление по фронту 100 м требуется оценочно 80 кг дисперсной среды. Для увеличения длительности возможно последовательное срабатывание генераторов.

Важной характеристикой заградительного дисперсного образования при его аэродинамическом взаимодействии с летящим телом является суммарный скоростной напор $S_{\Sigma} = \rho_1 |\mathbf{v}_1|^2 + \rho_2 |\mathbf{v}_2|^2$ от газового и дисперсного потока. Для указанных моментов времени (рис. 3) рассчитаны значения максимального суммарного скоростного напора в области дисперсного образования S_{Σ}^{\max} : $9,4 \cdot 10^5$; $1,4 \cdot 10^6$; $6,7 \cdot 10^4$ Н/м². Интересно сравнить полученные значения с интенсивностью атмосферных явлений – ураганов. Всемирной метеорологиче-

ской организацией для приближенной оценки скорости ветра по его воздействию на предметы или по волнению в открытом море принята двенадцатибалльная шкала Бофорта. Средняя скорость ветра указывается на стандартной высоте 10 м над открытой ровной поверхностью. Для удобства сравнения переведем эту шкалу в значения скоростного напора. Самый высокий уровень (ураган – 12 баллов) по шкале Бофорта, приводящий к фатальным разрушениям и катастрофическому аэродинамическому воздействию на предметы, соответствует скоростному напору $> 1,3 \cdot 10^3 \text{ Н/м}^2$. Сравнение с приведенными выше расчетными величинами показывает, что в локальном объеме заградительного дисперсного образования создается запредельный вихревой ураган, на порядки превышающий по интенсивности разрушительного действия максимальный уровень по нормативной шкале.

В отличие от выброса порошка из канала с полным заполнением $\varepsilon = 1$ генерация заградительного дисперсного образования с частичной загрузкой $\varepsilon < 1$ обладает рядом преимуществ. В последнем случае она имеет существенно большее радиальное расширение, что видно из рис. 4. На этом рисунке приведены распределения погонной массы дисперсной среды, отнесенной к ее начальной массе M_0 в канале: по оси $M_x = M_0^{-1} \int_0^{+\infty} 2\pi r_2 y dy$ и по радиусу струи $M_y = M_0^{-1} \int_0^{+\infty} 2\pi r_2 y dx$. Заметные колебания относительной массы вдоль выбранных направлений объясняются сложной вихревой структурой потока (см. рис. 3).

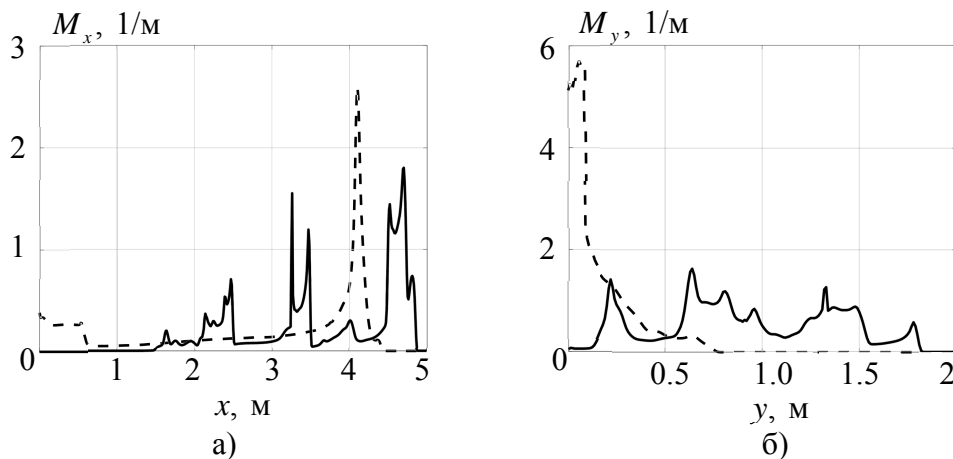


Рис. 4. Распределение погонной массы дисперсной среды в момент времени 130 мс:
а – осевое; б – радиальное; штриховая кривая – заполненный канал $\varepsilon = 1$;
сплошная линия – частично заполненный канал $\varepsilon = 1/3$

Кроме того, часть массы порошка при начальной полной загрузке генератора в последующие моменты времени остается в канале (рис. 4,а) и не используется в создании заградительного дисперсного образования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена методика обоснования генераторов заградительных дисперсных образований от воздействия факторов различной физической природы. Для подтверждения ее достоверности выполнено сравнение расчетных и экспериментальных данных по выбросу песка насыпной плотности под повышенным давлением в атмосферу. Изучен процесс истечения и эволюции газодисперсной среды из канала с различными коэффициентами загрузки. Определены интегральные характеристики: суммарный скоростной напор и распределение погон-

ной массы в осевом и радиальном направлениях. Дальнейшие исследования направлены на изучение защитных свойств заградительных дисперсных образований, а также безопасного размещения генераторов от защищаемого объекта.

Список используемых источников

1. Лагун А.В., Козлов В.В. Алгоритм создания защищенных космических ракетных комплексов // Труды Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы улучшения тактико-технических характеристик ракетно-космической техники, ее создания, испытаний и эксплуатации»: в 2 т. / под общ. ред. М.М. Пенькова. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2014. – Т. 2. – С. 206–211.

2. Моделирование взаимодействия дисперсных образований с объектами, пролетающими через них / А.В. Лагун, В.В. Козлов, И.О. Кукушкин и др. // III Всероссийская научно-практическая конференция «Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники». – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. – Т.1. – С. 159–163.

3. Патент об изобретении № 2656776. Способ защиты группового объекта от воздействия средств поражения заградительным дисперсным образованием / Лагун А.В., Козлов В.В., Беляев Б.В. Орлов, В.В. – № 2656776; заявл. 18.04.2016; дата гос. регистрации в Реестре ФИПС 06.06.2018.

4. Ударные волны при разлете сжатого объема газовзвеси твердых частиц / Б.Е. Гельфанд, А.В. Губанов, С.П. Медведев и др. // Докл. АН СССР. – 1985. – Т. 281, № 5. – С. 1113–1116.

5. Воздушные ударные волны при внезапном расширении сжатой двухфазной среды насыпной плотности / С.П. Медведев, А.И. Поленов, Б.Е. Гельфанд и др. // Физика горения и взрыва. – 1987. – № 3. – С. 135–139.

6. Любарский С.Д., Иванов А.С. Движение сжатой двухфазной среды насыпной плотности при внезапном расширении // Физика горения и взрыва. – 1989. – № 3. – С. 78–81.

7. Гилинский М.М., Гонор А.Л., Теверовский М.А. Разлет цилиндрических объемов гетерогенных металлизированных сред // Математ. моделирование нестационарных процессов в механике сплошных сред: сб. науч. тр. МИП. – М., 1990. – С. 69–83.

8. Кутушев А.Г., Рудаков Д.А. Численное исследование параметров воздушных УВ при разлете расширяющегося слоя порошкообразной среды // Физика горения и взрыва. – 1992. – № 6. – С. 105–112.

9. Ивандаев А.И., Кутушев А.Г., Рудаков Д.А. Численное исследование метания слоя порошка сжатым газом // Физика горения и взрыва. – 1995. – № 4. – С. 63–70.

10. Иванов А.С., Козлов В.В., Садин Д.В. Нестационарное истечение двухфазной дисперсной среды из цилиндрического канала конечных размеров в атмосферу // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. – 1996. – № 3. – С. 60–66.

11. Садин Д.В. Поведение нестационарной струи при истечении смеси газа высокого давления и дисперсной среды из цилиндрического канала в атмосферу // Прикладная механика и техническая физика. – 1999. – Т. 40, № 1. – С. 151–157.

12. Садин Д.В., Любарский С.Д., Гравченко Ю.А. Особенности недорасширенной импульсной импактной газодисперсной струи с высокой концентрацией частиц // Журнал технической физики. – 2017. – Т. 87, вып. 1. – С. 22–26.

13. Садин Д.В., Гузенков В.О., Любарский С.Д. Численное исследование структуры нестационарной двухфазной тонкодисперсной струи // Прикладная механика и техническая физика. – 2005. – Т. 46, № 2. – С. 91–97.

14. Нигматулин Р.И., Губайдуллин Д.А., Тукмаков Д.А. Ударно-волновой разлет газовзвесей // Доклады академии наук. – 2016. – Т. 466, № 4. – С. 418–421.

15. *Нигматулин Р.И.* Динамика многофазных сред. – М.: Наука, 1987. – Ч. 1, 2.
16. *Садин Д.В.* TVD-схема для жестких задач волновой динамики гетерогенных сред негиперболического неконсервативного типа // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2016. – Т. 56, № 12. – С. 2098–2109.
17. *Садин Д.В.* Схемы с настраиваемыми диссипативными свойствами для численного моделирования течений газа и газовзвесей // Математическое моделирование. – 2017. – Т. 29, № 12. – С. 89–104.
18. *Садин Д.В.* Модификация метода крупных частиц до схемы второго порядка точности по пространству и времени для ударно-волновых течений газовзвеси // Вестник ЮУрГУ. Сер. Математическое моделирование и программирование. – 2019. – Т. 12, № 2. – С. 112–122.
19. *Садин Д.В.* Модифицированный метод крупных частиц для расчета нестационарных течений газа в пористой среде // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1996. – Т. 36, № 10. – С. 158–164.
20. *Садин Д.В.* Метод расчета волновых гетерогенных течений с интенсивным межфазным взаимодействием // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1998. – Т. 38, № 6. – С. 1033–1039.

И.В. Дорожко,
кандидат техн. наук;
А.Л. Копейка;
Н.А. Осипов,
кандидат техн. наук, доцент

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНИВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ГОТОВНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ С УЧЕТОМ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

В публикации представлена разработанная с помощью надстройки Stateflow программного продукта Matlab имитационная модель, позволяющая вычислять коэффициент готовности с учетом показателей контроля сложных технических комплексов. Приведенные в работе аналитические расчеты позволяют говорить об адекватности разработанной имитационной модели. Преимуществом имитационной модели по сравнению с аналитическими является возможность рассмотрения нестационарных процессов, когда варьируются значения показателей надежности.

Ключевые слова: надежность, контроль, диагностирование, коэффициент готовности, достоверность, ошибки, марковский процесс, имитационная модель.

ВВЕДЕНИЕ

Выявление зависимостей между показателями надежности и контроля является весьма актуальной задачей в настоящее время. Современные сложные технические комплексы (СТК) имеют в своем составе встроенные средства аппаратного и программного контроля и диагностирования. Вопросы обеспечения надежности и контроля (диагностирования) рассматриваются начиная с этапа проектирования объекта и указываются в общих технических требованиях (ОТТ) и технических заданиях (ТЗ). Так, в ТЗ присутствуют разделы «Требования к диагностическому обеспечению» и «Требования надежности», в которых приводятся:

- значения достоверности контроля (диагностирования);
- периодичность контроля (диагностирования);
- глубина диагностирования (например, до сменного модуля);
- допустимые значения ошибок 1-го и 2-го рода;
- требования к средней наработке до (на) отказа и среднему (или максимальному) времени восстановления;
- вероятность безотказной работы;
- коэффициент готовности объекта.

Очевидная связь показателей контроля (диагностирования) и показателей надежности сложных технических комплексов на практике редко имеет формализованное описание и количественную оценку. В связи с этим задача получения и исследования аналитических зависимостей и имитационных моделей, связывающих показатели надежности и контроля, является весьма актуальной.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, СВЯЗЫВАЮЩАЯ КОЭФФИЦИЕНТ ГОТОВНОСТИ И ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНТРОЛЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

В работах [4, 5] была рассмотрена модель, связывающая показатели контроля (периодичность, достоверность, ошибки 1-го и 2-го рода контроля) и коэффициент готовности СТК.

Данная модель представлена в виде марковского процесса, граф которого изображен на рис. 1. В качестве состояний марковского процесса выступают работоспособное и неработоспособное технические состояния объекта (S_0 , \bar{S}_0), в которых контроль не проводится (т.е. «рабочий режим»); а также состояния, при которых производится контроль: R_1 , R_3 – состояния с достоверными результатами контроля СТК [S_0^*/S_0 – система контроля сообщает о работоспособном состоянии S_0^* при условии, что СТК действительно в состоянии S_0 (работоспособен), \bar{S}_0^*/\bar{S}_0 – система контроля сигнализирует об отказе (неработоспособном состоянии) \bar{S}_0^* при условии, что СТК действительно отказал (неработоспособен) \bar{S}_0]; R_2 , R_4 – состояния контроля объекта с ошибочным результатом (\bar{S}_0^*/S_0 – система контроля сигнализирует об отказе СТК \bar{S}_0^* , а при этом СТК на самом деле работоспособен S_0 , S_0^*/\bar{S}_0 – результатом контроля является работоспособное состояние S_0^* , а при этом СТК отказал \bar{S}_0).

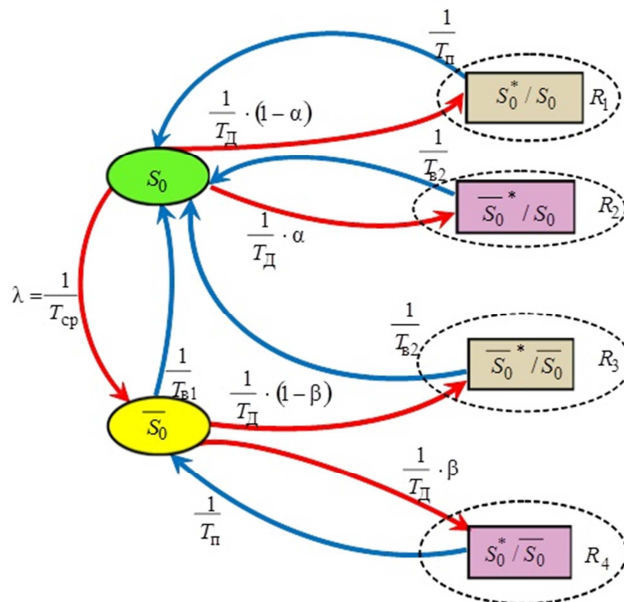


Рис. 1. Граф, связывающий характеристики контроля и показатели надежности

На рис. 1 также имеются следующие обозначения: T_{cp} – средняя наработка на отказ; T_D – периодичность контроля; α , β – вероятности ошибок 1-го и 2-го рода; T_{B1} – среднее время восстановления без средств контроля. Допускается, что СТК можно восстановить даже без использования (или при отказе) средств контроля, например, производя поочередную замену блоков до момента, пока СТК не заработает снова (т.е. пока не станет работоспособным), очевидно, что этот процесс может быть длительным и ресурсозатратным. Если же СТК невозможно восстановить без применения средств контроля, то для дальнейшего моделирования можно принять, что $T_{B1} \rightarrow \infty$; T_{B2} – среднее время восстановления с применением средств контроля; T_{Π} – среднее время перевода (переключения) объекта из состояния контроля в рабочее состояние [если контроль проводится в фоновом режиме, т.е. параллельно с работой СТК (функциональный контроль), то $T_{\Pi} = 0$, но если производится тестовый контроль, при котором СТК последовательно переводится из состояния контроля в рабочее со-

стояние и обратно, причем во время контроля объект не может в полном объеме выполнять свои функции, то пренебрегать значением T_{Π} нельзя и необходимо учитывать в модели].

Данная модель имеет следующие преимущества:

- учитывает достоверность (или ошибки) результатов контроля;
- дает возможность рассмотрения предельных случаев: отсутствия контроля и наличия постоянного контроля;
- учитывает разные виды контроля: тестовый ($T_{\Pi} \neq 0$) и функциональный ($T_{\Pi} = 0$).

ВЫВОД ФОРМУЛЫ, СВЯЗЫВАЮЩЕЙ ПОКАЗАТЕЛИ КОНТРОЛЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ И КОЭФФИЦИЕНТ ГОТОВНОСТИ

Анализ графа (см. рис. 1) позволяет составить систему дифференциальных уравнений (ДУ):

$$\left\{ \begin{array}{l} -\left(\frac{1}{T_{\text{Д}}} + \frac{1}{T_{\text{СР}}}\right) \cdot P_{S_0}(t) + \frac{1}{T_{\text{В1}}} \cdot P_{S_0^*}(t) + \frac{1}{T_{\Pi}} \cdot P_{R_1}(t) + \frac{1}{T_{\text{В2}}} \cdot (P_{R_2}(t) + P_{R_3}(t)) = \frac{d(P_{S_0}(t))}{dt}; \\ \frac{1}{T_{\text{СР}}} \cdot P_{S_0}(t) - \left(\frac{1}{T_{\text{Д}}} + \frac{1}{T_{\text{В1}}}\right) \cdot P_{S_0^*}(t) + \frac{1}{T_{\Pi}} \cdot P_{R_4}(t) = \frac{d(P_{S_0^*}(t))}{dt}; \\ \frac{1-\alpha}{T_{\text{Д}}} \cdot P_{S_0}(t) - \frac{1}{T_{\Pi}} \cdot P_{R_1}(t) = \frac{d(P_{R_1}(t))}{dt}; \\ \frac{\alpha}{T_{\text{Д}}} \cdot P_{S_0}(t) - \frac{1}{T_{\text{В2}}} \cdot P_{R_2}(t) = \frac{d(P_{R_2}(t))}{dt}; \\ \frac{1-\beta}{T_{\text{Д}}} \cdot P_{S_0}(t) - \frac{1}{T_{\text{В2}}} \cdot P_{R_3}(t) = \frac{d(P_{R_3}(t))}{dt}; \\ \frac{\beta}{T_{\text{Д}}} \cdot P_{S_0}(t) - \frac{1}{T_{\Pi}} \cdot P_{R_4}(t) = \frac{d(P_{R_4}(t))}{dt}. \end{array} \right. \quad (1)$$

Известно, что коэффициент готовности – это вероятность нахождения объекта в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается [3]. Исходя из графа, изображенного на рис. 1, объект имеет три состояния S_0 , S_0^*/S_0 , $\overline{S_0^*}/S_0$, при которых он работоспособен. Но в состоянии $\overline{S_0^*}/S_0$ по результатам контроля объект признается отказавшим (ошибочный результат контроля) и восстанавливается, следовательно, данное состояние не может рассматриваться при расчете коэффициента готовности. А состояние S_0^*/S_0 хоть и имеет результатом контроля то, что объект работоспособен, но может учитываться при расчете коэффициента готовности только при условии, что рассматривается функциональный контроль ($T_{\Pi}=0$), который проводится в фоновом режиме параллельно с работой СТК. При тестовом контроле ($T_{\Pi} \neq 0$) состояние S_0^*/S_0 (т.е. тестирование объекта) не учитывается при расчете коэффициента готовности, так как в течение этого планового периода применение СТК по назначению не предусматривается. Таким образом, для определения коэффициента готовности необходимо определить финальную вероятность состояния S_0 . Следовательно, система дифференциальных уравнений (1) для стационарного режима преобразуется в систему алгебраических уравнений (2):

$$\left\{ \begin{array}{l} -\left(\frac{1}{T_D} + \frac{1}{T_{CP}}\right) \cdot P_{S_0} + \frac{1}{T_{B1}} \cdot P_{S_0} + \frac{1}{T_{II}} \cdot P_{R_1} + \frac{1}{T_{B2}} \cdot (P_{R_2} + P_{R_3}) = 0; \\ \frac{1}{T_{CP}} \cdot P_{S_0} - \left(\frac{1}{T_D} + \frac{1}{T_{B1}}\right) \cdot P_{S_0} + \frac{1}{T_{II}} \cdot P_{R_4} = 0; \\ \frac{1-\alpha}{T_D} \cdot P_{S_0} - \frac{1}{T_{II}} \cdot P_{R_1} = 0; \\ \frac{\alpha}{T_D} \cdot P_{S_0} - \frac{1}{T_{B2}} \cdot P_{R_2} = 0; \\ \frac{1-\beta}{T_D} \cdot P_{S_0} - \frac{1}{T_{B2}} \cdot P_{R_3} = 0; \\ \frac{\beta}{T_D} \cdot P_{S_0} - \frac{1}{T_{II}} \cdot P_{R_4} = 0. \end{array} \right. \quad (2)$$

Добавим уравнения нормировки для однозначного решения систем уравнений (1) и (2) – $P_{S_0}(t) + P_{S_0}(t) + P_{R_1}(t) + P_{R_2}(t) + P_{R_3}(t) + P_{R_4}(t) = 1$ и $P_{S_0} + P_{S_0} + P_{R_1} + P_{R_2} + P_{R_3} + P_{R_4} = 1$ соответственно, что справедливо, так как все шесть состояний образуют полную группу событий.

Решение системы уравнений (2) позволяет получить формулу для коэффициента готовности с учетом таких характеристик и показателей контроля, как достоверность (через ошибки α и β), периодичность (T_D) и продолжительность (T_{II}) контроля:

$$K_{\Gamma} = P_{S_0} = \frac{T_{CP} \cdot T_D \cdot (T_{B1} \cdot (1-\beta) + T_D)}{T_{CP} \cdot T_{B1} \cdot (1-\beta) \cdot (T_{B2} \cdot \alpha + T_{II} \cdot (1-\alpha)) + T_{CP} \cdot T_D \cdot (T_{II} \cdot (1-\alpha) + T_{B1} \cdot (1-\beta)) + T_D \cdot (T_{B1} \cdot T_{B2} \cdot (1-\beta) + T_D \cdot (T_{CP} + T_{B1}) + T_{CP} \cdot T_{B2} \cdot \alpha + T_{II} \cdot T_{B1} \cdot \beta)}. \quad (3)$$

Если проводится только функциональный контроль, то $T_{II} = 0$ и формула (3) преобразуется к следующему виду:

$$K_{\Gamma} = \frac{T_{CP} \cdot T_D \cdot (T_{B1} \cdot (1-\beta) + T_D)}{T_{CP} \cdot T_{B1} \cdot (1-\beta) \cdot T_{B2} \cdot \alpha + T_{CP} \cdot T_D \cdot T_{B1} \cdot (1-\beta) + T_D \cdot (T_{B1} \cdot T_{B2} \cdot (1-\beta) + T_D \cdot (T_{CP} + T_{B1}) + T_{CP} \cdot T_{B2} \cdot \alpha)}. \quad (4)$$

Если проводится тестовый контроль без ошибок ($\alpha = 0, \beta = 0$), то формула (3) примет вид

$$K_{\Gamma} = \frac{T_{CP} \cdot T_D \cdot (T_{B1} + T_D)}{T_{CP} \cdot T_{B1} \cdot T_{II} + T_{CP} \cdot T_D \cdot (T_{II} + T_{B1}) + T_D \cdot (T_{B1} \cdot T_{B2} + T_D \cdot (T_{CP} + T_{B1}))}. \quad (5)$$

Если проводится функциональный контроль без ошибок ($\alpha = 0, \beta = 0, T_{II} = 0$), то формула (3) преобразуется и приобретает следующий вид:

$$K_{\Gamma} = \frac{T_{CP} \cdot (T_{B1} + T_D)}{T_{CP} \cdot T_{B1} + T_{B1} \cdot T_{B2} + T_D \cdot T_{CP} + T_D \cdot T_{B1}} = \frac{T_{CP}}{T_{CP} + T_{B1} \cdot \frac{T_{B2} + T_D}{(T_{B1} + T_D)}}. \quad (6)$$

Если контроль вообще не учитывать (т.е. $T_D \rightarrow \infty$), то формула (3) упростится до известной из теории надежности систем формулу [1, 3, 8, 9]:

$$K_{\Gamma} = \frac{T_{CP}}{T_{CP} + T_{B1}}. \quad (7)$$

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНИВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ С УЧЕТОМ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

В программном продукте Matlab (в последних его версиях) имеется среда для построения вероятностных графических моделей – Stateflow [6, 10]. На рис. 2 представлена имитационная модель, построенная в среде Matlab.

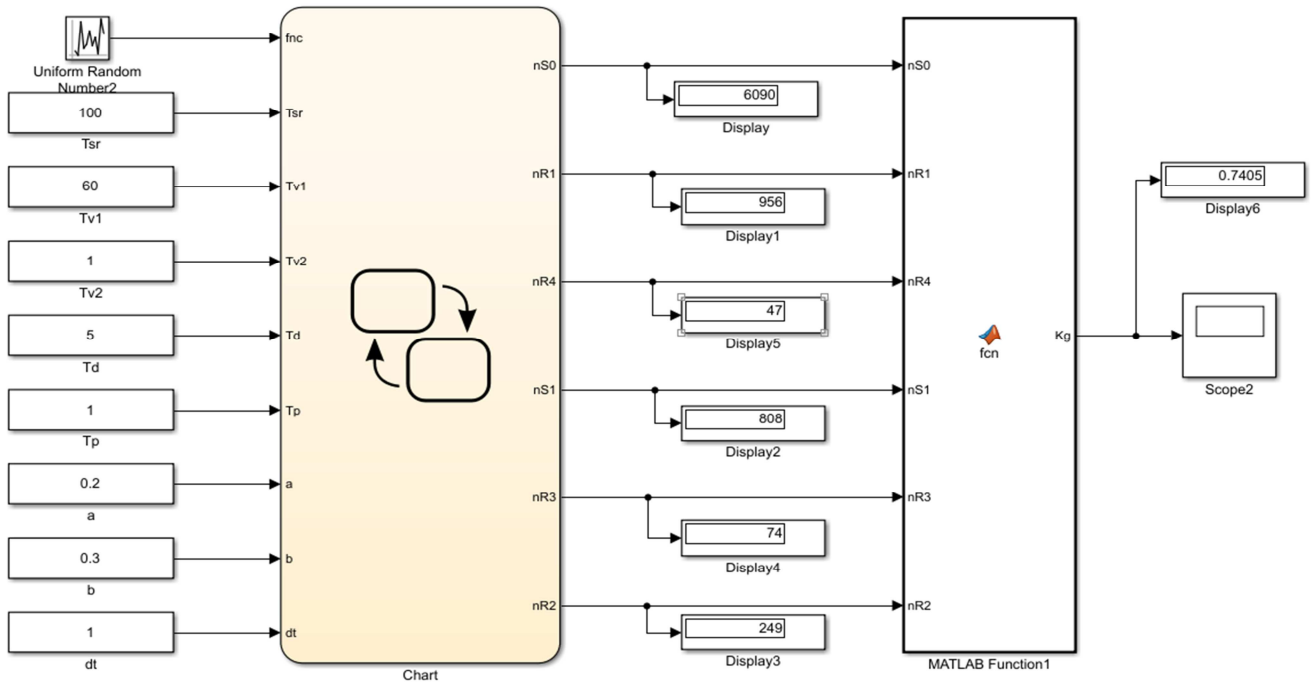


Рис. 2. Имитационная модель, построенная в Stateflow

Преобразуем матрицу интенсивностей переходов в матрицу вероятностей переходов. Для этого, используя уравнение Колмогорова – Чепмена, перейдем к дифференциальным уравнениям, описывающим марковский процесс:

$$P(t + \Delta t) = P(t) \cdot \mathbf{P},$$

где \mathbf{P} – матрица вероятностей переходов;

$$P(t + \Delta t) - P(t) = P(t) \cdot \mathbf{P} - P(t),$$

$$\frac{P(t + \Delta t) - P(t)}{\Delta t} = \frac{P(t) \cdot (\mathbf{P} - \mathbf{E})}{\Delta t},$$

где \mathbf{E} – единичная матрица;

$$\dot{P}(t) = P(t) \cdot \mathbf{A},$$

где \mathbf{A} – матрица интенсивностей переходов, $\mathbf{A} = \frac{\mathbf{P} - \mathbf{E}}{\Delta t}$.

Из приведенных уравнений получим: $\mathbf{P} = \mathbf{A} \cdot \Delta t + \mathbf{E}$.

Для программной реализации входящей в блок «Chart» (рис. 2) марковской модели преобразуем матрицу интенсивностей переходов:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{1}{T_d} + \frac{1}{T_{CP}}\right) & \frac{1}{T_{CP}} & \frac{1-\alpha}{T_d} & \frac{\alpha}{T_d} & 0 & 0 \\ \frac{1}{T_{B1}} & -\left(\frac{1}{T_d} + \frac{1}{T_{B1}}\right) & 0 & 0 & \frac{1-\beta}{T_d} & \frac{\beta}{T_d} \\ \frac{1}{T_{II}} & 0 & -\frac{1}{T_{II}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{T_{B2}} & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{B2}} & 0 & 0 \\ \frac{1}{T_{B2}} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{B2}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_{II}} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{II}} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

из систем уравнений (1) и (2) в матрицу вероятностей переходов:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1 - \left(\frac{1}{T_d} + \frac{1}{T_{CP}}\right) \cdot \Delta t & \frac{1}{T_{CP}} \cdot \Delta t & \frac{1-\alpha}{T_d} \cdot \Delta t & \frac{\alpha}{T_d} \cdot \Delta t & 0 & 0 \\ \frac{1}{T_{B1}} \cdot \Delta t & 1 - \left(\frac{1}{T_d} + \frac{1}{T_{B1}}\right) \cdot \Delta t & 0 & 0 & \frac{1-\beta}{T_d} \cdot \Delta t & \frac{\beta}{T_d} \cdot \Delta t \\ \frac{1}{T_{II}} \cdot \Delta t & 0 & 1 - \frac{1}{T_{II}} \cdot \Delta t & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{T_{B2}} \cdot \Delta t & 0 & 0 & 1 - \frac{1}{T_{B2}} \cdot \Delta t & 0 & 0 \\ \frac{1}{T_{B2}} \cdot \Delta t & 0 & 0 & 0 & 1 - \frac{1}{T_{B2}} \cdot \Delta t & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_{II}} \cdot \Delta t & 0 & 0 & 0 & 1 - \frac{1}{T_{II}} \cdot \Delta t \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Разработанная имитационная модель изображена на рис. 3 (Δt обозначили как dt , так как $dt = \Delta t$ при $\Delta t \rightarrow 0$, а α и β обозначены как a и b соответственно). Логика работы данной имитационной модели такая же, как и у модели, изображенной на рис. 1 и описанной в работах [4, 5].

Для проверки на адекватность разработанной имитационной модели сначала исследование проводилось без учета контроля и диагностирования ($T_d \rightarrow \infty$). На рис. 4 представлены результаты имитационного моделирования при отсутствии результатов контроля и диагностирования (средства контроля выключены).

Входными данными являлись следующие значения:

- $T_{CP} = 100$ ч;
- $T_{B1} = 60$ ч;
- $T_{B2} = 1$ ч;

- $T_D = 1000000$ ч (т.е. период диагностирования очень большой: $T_D \rightarrow \infty$);
- $T_{II} = 1$ ч;
- $\alpha = \beta = 0$.

При этом коэффициент готовности, вычисленный по известной аналитической зависимости (7) составляет

$$K_{\Gamma} = \frac{T_{CP}}{T_{CP} + T_{B1}} = \frac{100}{100 + 60} \approx 0,625 \text{ (ч)}.$$

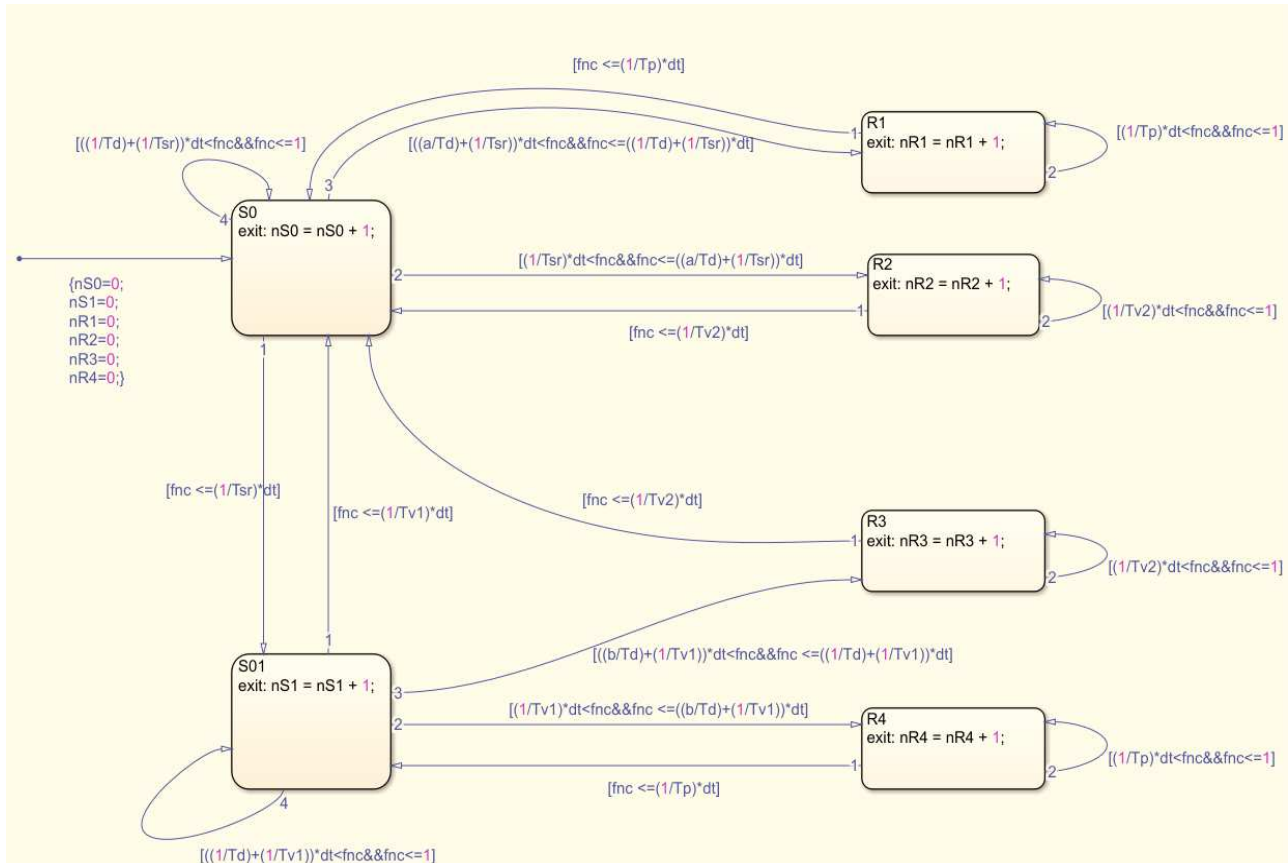


Рис. 3. Содержание блока «Chart» в Stateflow (Matlab)

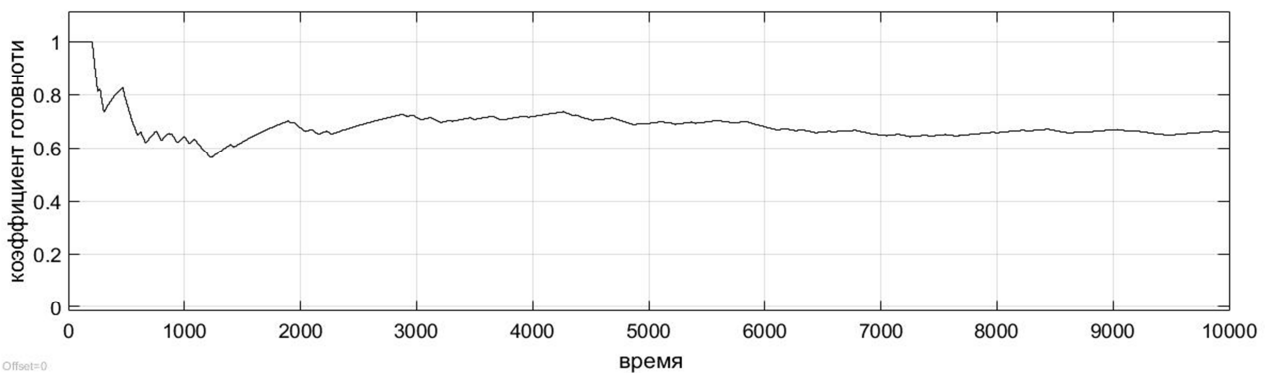


Рис. 4. Результаты имитационного моделирования в Stateflow (Matlab) при отсутствии влияния контроля (диагностирования)

Как видно из рис. 4, результаты, полученные с помощью имитационной модели, близки к результату, полученному с помощью аналитической модели.

Далее при имитационном моделировании не учитывались ошибки контроля (т.е. $\alpha = \beta = 0$), при этом $T_D = 5$ ч. На рис. 5 представлены результаты имитации.

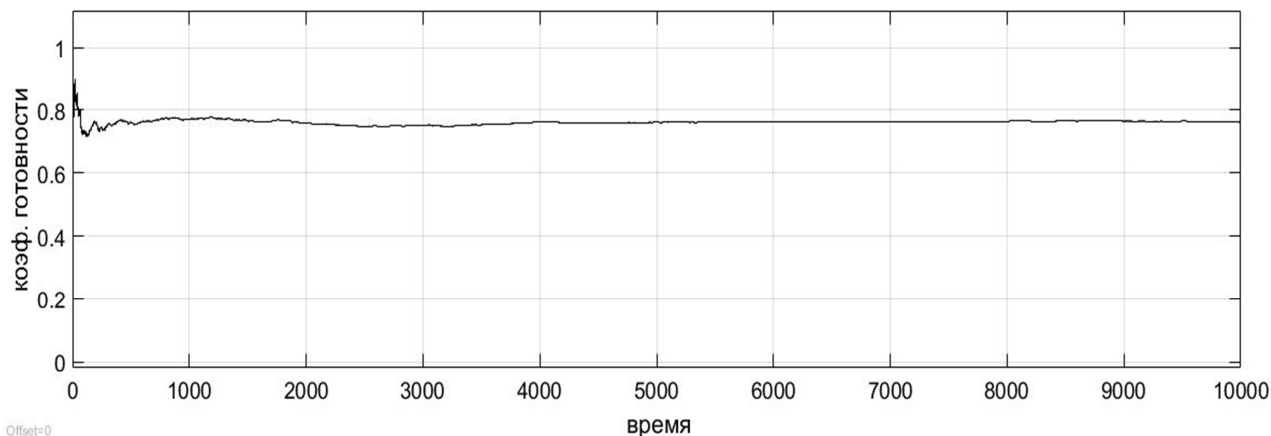


Рис. 5. Результаты имитационного моделирования при учете влияния только достоверного контроля (диагностирования), ошибки контроля отсутствуют

По аналитической модели (3) получено значение K_G , равное 0,797.

На следующем этапе имитационного моделирования учитывались ошибки 1-го и 2-го рода. Исходными данными являлись следующие значения:

- $T_{CP} = 100$ ч;
- $T_{B1} = 60$ ч;
- $T_{B2} = 1$ ч;
- $T_D = 5$ ч;
- $T_{II} = 1$ ч;
- $\alpha = 0,2$ и $\beta = 0,3$.

Результаты имитационного моделирования представлены на рис. 6.

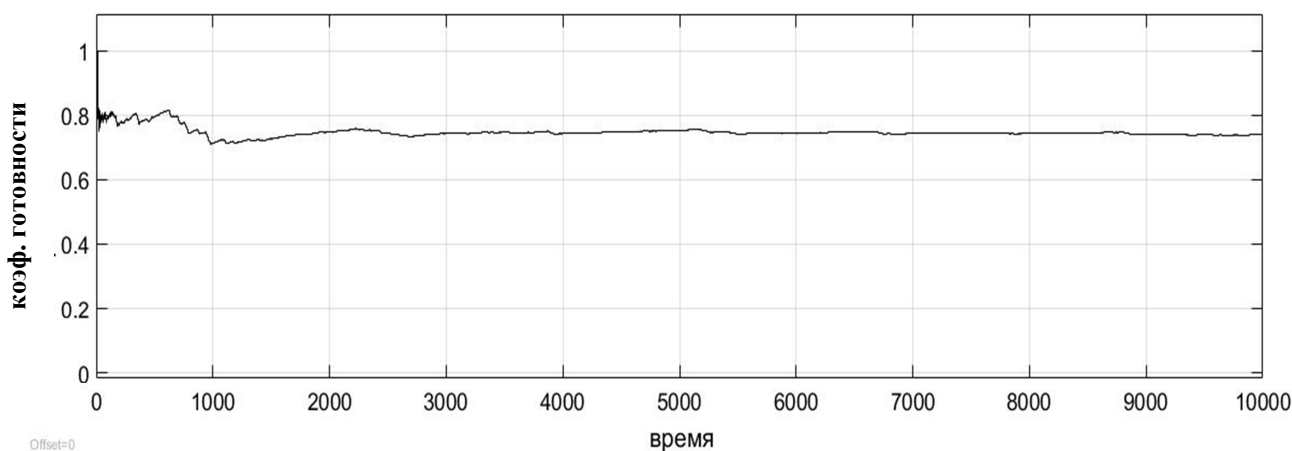


Рис. 6. График коэффициента готовности СТК с учетом показателей контроля и диагностирования, полученный в результате имитационного моделирования в Stateflow (Matlab)

По аналитической модели (3) значение K_r составляет 0,783.

Таким образом, результаты имитационного моделирования практически совпадают с результатами вычислений, выполненных по аналитической модели. Некоторые несущественные расхождения объясняются тем, что имитационная модель при однократном запуске выдает конкретную реализацию работы СТК, а аналитическая модель – обобщенную усредненную оценку. Многократное повторение имитации при одних и тех же входных данных и обработка полученных результатов позволяют получить сходимость результатов с аналитической моделью. При этом имитационная модель обладает следующими важнейшими преимуществами по сравнению с аналитической моделью.

1. Имитационная модель позволяет моделировать объекты и процессы высокой сложности с большим количеством элементов и параметров. Аналитическое представление функциональных зависимостей в таких моделях может оказаться громоздким и необработываемым. Для СТК при составлении графа состояний необходимо учитывать различные режимы эксплуатации, большое число состояний, а следовательно, значительно вырастает уровень сложности аналитического решения систем уравнений и не для всех задач можно найти это решение в аналитическом виде.

2. Имитационная модель эффективно применяется в условиях неопределенности, при неполных и неточных данных для стохастических систем, когда присутствуют случайные факторы внешней среды.

3. Имитационная модель позволяет исследовать различные сценарии при любых входных данных, даже которые в реальности не могут быть воспроизведены испытательным оборудованием или могут повлечь негативные последствия в СТК. Имитационная модель при этом значительно менее затратна, чем натурные исследования.

4. Предложенную имитационную модель можно масштабировать, дорабатывать и усложнять. Входными данными могут быть не только конкретные значения (константы) средней наработки на отказ или периодичности контроля, но и переменные величины. Это позволяет учесть, например, тот факт, что объект может иметь различную T_{CP} в зависимости от режима эксплуатации (для хранения одно значение T_{CP} , для применения – другое). В справочных данных указывается, что средняя наработка на отказ в режиме хранения составляет примерно $(10^2 \div 10^3) \cdot T_{CP}$.

На рис. 7 представлен график изменения T_{CP} в зависимости от смены режимов эксплуатации (чередуются режимы хранения и применения по назначению) согласно технологическому графику.

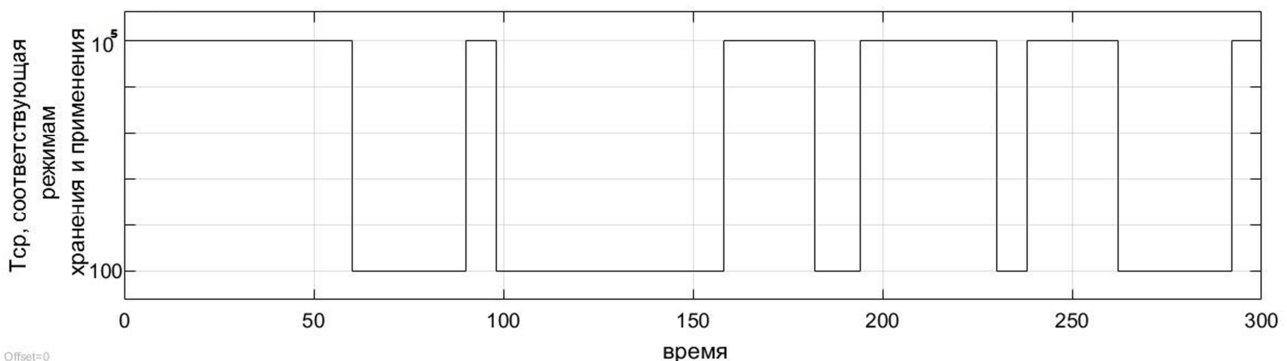


Рис. 7. График изменения T_{CP} в зависимости от режима эксплуатации

На рис. 8 представлен вид имитационной модели надежности и диагностирования с указанием длительностей отдельных режимов эксплуатации.

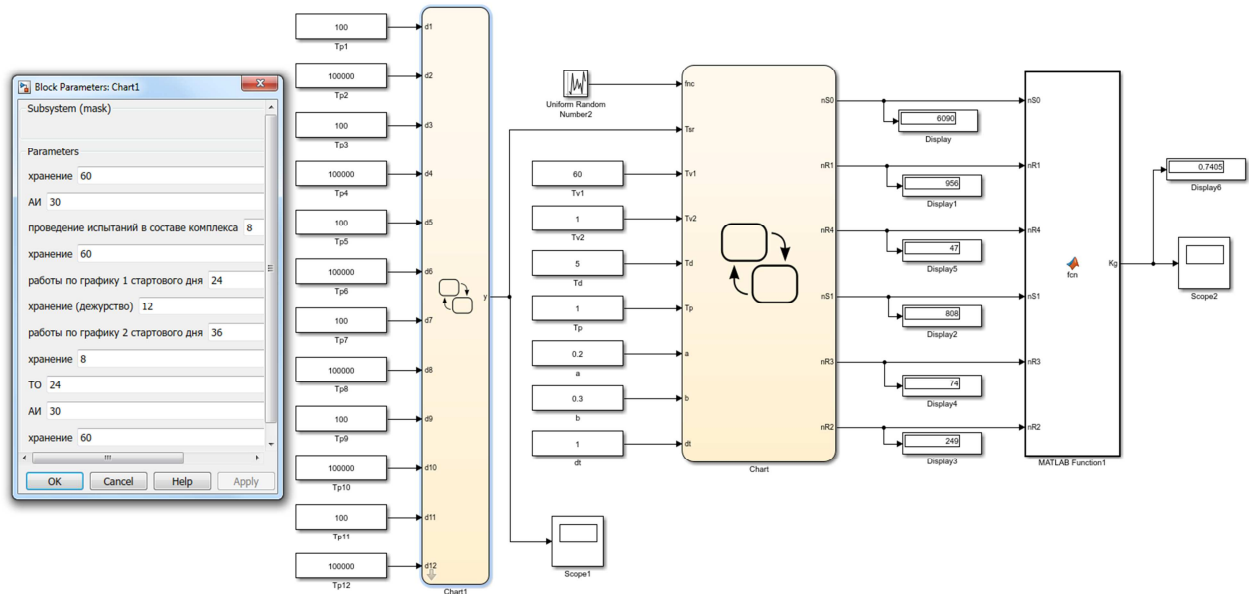


Рис. 8. Имитационная модель надежности и диагностирования, построенная в Stateflow (Matlab), с учетом режимов эксплуатации

На рис. 9 представлены результаты моделирования с учетом смены режимов эксплуатации.

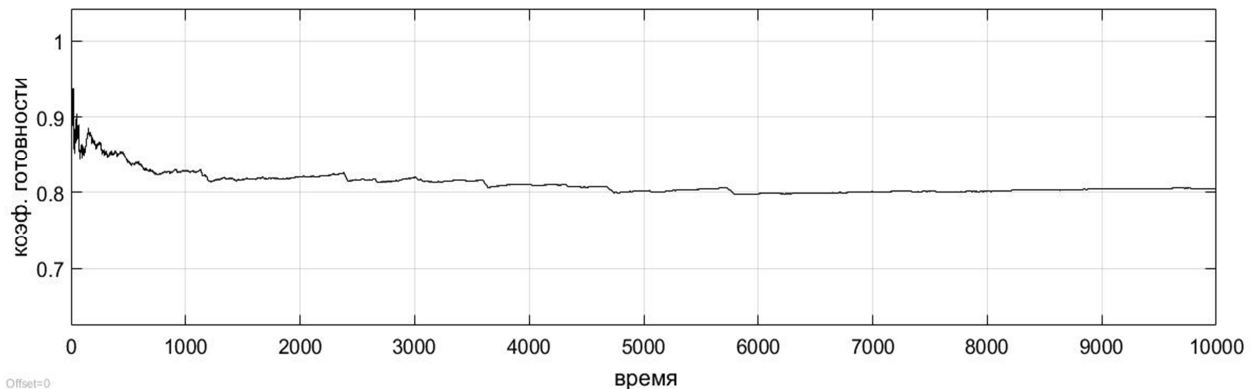


Рис. 9. Результаты имитационного моделирования в Stateflow (Matlab) с учетом изменяющегося параметра T_{CP} в зависимости от режимов эксплуатации

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная в работе имитационная модель является наряду с аналитическими моделями продолжением исследований зависимостей показателей надежности от показателей контроля (диагностирования) СТК. В качестве входных данных при имитационном моделировании можно вводить не только константы, но и переменные и функциональные зависимости, например, изменяя среднюю наработку на отказ, можно моделировать и учитывать различные режимы эксплуатации СТК. Дальнейшее развитие имитационной модели представляется в решении задач обеспечения требуемого значения коэффициента готовности путем управления входными параметрами, например регулированием периодичности контроля (диагностирования).

Список используемых источников

1. *Боровиков С.М., Цырельчук И.Н., Троян Ф.Д.* Расчет показателей надежности радиоэлектронных средств. – Минск: БГУИР, 2010. – 68 с.
2. ГОСТ 20.911-89. Техническая диагностика. Термины и определения. – М.: Издательство стандартов, 1990. – 12 с.
3. ГОСТ 27.002-15. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2016. – 24 с.
4. *Дорожко И.В., Копейка А.Л.* Исследование коэффициента готовности сложных технических комплексов с помощью имитационной модели, разработанной в среде Stateflow // Интеллектуальные технологии на транспорте (Intellectual Technologies on Transport). – 2018. – № 3. – С. 18–26.
5. Комплексная модель надежности и диагностирования сложных технических систем / И.В. Дорожко, И.А. Кочанов, Н.А. Осипов и др. // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. – Вып. 652. – С. 137–146.
6. *Дьяконов В.П.* Simulink5/6/7: самоучитель. – М.: ДМК-Пресс, 2008. – 784 с.
7. Технические средства диагностирования: справочник / В.В. Ключев и др.: под общ. ред. В.В. Ключева. – М.: Машиностроение, 1989. – 671 с.
8. *Острейковский В.А.* Теория надежности. – М.: Высш. шк., 2003. – 463 с.
9. *Половко А.М., Гуров С.В.* Основы теории надежности. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.
10. Stateflow® and Stateflow® Coder™ User's Guide 2017 by The MathWorks, Inc. – URL: http://physics.fme.vutbr.cz/~rudolf/Download/Matlab/Literature/sf_ug.pdf (дата обращения: 03.09.2018).

А.И. Карин;
С.А. Карин,
кандидат военных наук, доцент;
В.В. Октябрьский,
кандидат техн. наук

МОДЕЛИ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЕМ СИСТЕМ КОМПЛЕКСНОЙ ОБРАБОТКИ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ МОНИТОРИНГА ТЕРРИТОРИАЛЬНО-РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Описана модель функционирования системы комплексной обработки геопространственных данных на основе многоканальных многостадийных систем массового обслуживания (СМО) с приоритетным обслуживанием. Представлены разработанные на основе данной модели принципы и критерии управления функционированием системы комплексной обработки геопространственных данных, которые легли в основу предложенной концептуальной модели адаптивного управления, также модели управления функционированием системы комплексной обработки геопространственных данных на основе адаптивных систем с обратной связью.

Ключевые слова: геопространственные данные, дистанционное зондирование Земли, комплексная обработка, адаптивное управление с обратной связью, многоканальные многостадийные СМО с приоритетным обслуживанием.

ВВЕДЕНИЕ

Практика показывает, что решение различных аналитических задач, решаемых органами государственного и муниципального управления (ГМУ) и предполагающих осуществление мониторинга пространственных территориально-распределенных объектов, не менее чем на 85 % обеспечивается средствами дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) космического и воздушного базирования. При этом среди рассматриваемых территориально-распределенных объектов мониторинга (ОМ) основными являются элементы городской инфраструктуры, лесные массивы, сельскохозяйственные угодья, объекты оборонно-промышленного комплекса, потенциально-опасные объекты на территории муниципальных образований (дамбы, нефтяные хранилища, промышленные предприятия) и т.п.

Функционирование отделов и учреждений органов ГМУ, осуществляющих решение указанных задач и представляющих собой систему наземных средств обработки данных ДЗЗ, предполагает реализацию единого технологического цикла (ЕТЦ), в рамках которого осуществляется информационное взаимодействие целого ряда разнородных и территориально-распределенных комплексов обработки (информационно-вычислительных ресурсов).

В качестве таких комплексов обработки (КО) могут выступать специализированные информационно-вычислительные системы, автоматизированные рабочие места (АРМ), тематические базы и банки данных, в которых накапливаются «сырые» данные и результаты их обработки, автоматизированные системы (АС), осуществляющие отдельные сложные этапы специальной обработки в рамках ЕТЦ. При этом в совокупности они составляют единую систему комплексной обработки геопространственных данных (СКО ГПД) [1–3].

Реализация ЕТЦ включает в свой состав несколько этапов, начиная с формирования заявок на выполнение тех или иных работ и заканчивая выдачей потребителям результатов. Каждый КО при этом обеспечивает выполнение одной операции в рамках ЕТЦ, затрачивая при этом некоторое время. Полагается, что в один момент времени отдельный КО может осуществлять решение только одной подзадачи. Исходя из того, как, когда и какую инфор-

мацию предоставляет тот или иной комплекс обработки в качестве результата решения своей подзадачи, определяется степень его вклада в получение интегрального результата в целом.

В условиях возрастания числа и типов решаемых задач, а также возможностей средств сбора данных ДЗЗ в настоящее время ужесточаются требования к срокам предоставления результатов решения поставленных задач, что накладывает жесткие временные рамки на процесс комплексной обработки и входит в противоречие с текущими возможностями СКО ГПД, тем самым определяя ее ресурсную ограниченность. При этом большое разнообразие ситуаций, возникающих при управлении функционированием СКО ГПД, вызвано следующими причинами:

- территориальной распределенностью и ограниченностью комплексов обработки, входящих в СКО ГПД;
- большим потоком заявок на предоставление той или иной информации по ОМ;
- большим и постоянно возрастающим объемом обрабатываемой информации.

Все это обуславливает необходимость оперативной выработки управленческих решений на формирование таких планов применения комплексов обработки, которые удовлетворяли бы разнородным критериям. Среди этих критериев можно выделить следующие две группы:

- 1) критерии, обеспечивающие возможность адаптации к текущим условиям (в частности, описывающие условия изменения приоритетов поступающих заявок на решение задач);
- 2) критерии, обеспечивающие возможность адаптации к текущим возможностям СКО ГПД (в частности, описывающие условия для исключения из плана применения тех КО, которые вносят незначительный вклад в интегральный результат).

Основой автоматизированного управления функционированием СКО ГПД является формализованное описание условий выработки управленческого решения и его качества, т.е. модель функционирования. В качестве основы для разработки таких моделей, в частности, могут выступать модели из теории массового обслуживания, позволяющие учитывать основные особенности функционирования СКО ГПД.

В настоящей публикации описана модель управления функционированием СКО ГПД, которая относится к классу адаптивных систем с обратной связью [4, 5]. Данная модель будет служить основой для реализации технологии адаптивного управления СКО ГПД, которая позволит в реальном масштабе времени или близком к нему осуществлять обоснованное и рациональное распределение (перераспределение) привлекаемых КО на решение первоочередных задач, имеющих более высокий приоритет по сравнению с текущими.

МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ КОМПЛЕКСНОЙ ОБРАБОТКИ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ МНОГОКАНАЛЬНЫХ МНОГОСТАДИЙНЫХ СИСТЕМ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ С ПРИОРИТЕТНЫМ ОБСЛУЖИВАНИЕМ

Модель функционирования СКО ГПД можно отнести к классу многоканальных многостадийных СМО с очередями, реализующими обслуживание с приоритетом. Схема данной модели представлена на рис. 1.

Рассматриваемая СМО включает в свой состав N типов комплексов обработки. Имеющиеся КО задаются множеством $R = \{r_{n,k}\}$, $n \in [1, N]$, где n – тип КО; k – номер КО n -го типа.

О доступности КО в i -й момент времени можно судить на основании множества $\Theta = \{\sigma_{n,k}\}$.

В качестве элементов данного множества выступают значения, определяющие оставшееся время до того момента, когда соответствующий КО станет свободным.

На вход рассматриваемой СМО поступает поток заявок на решение задач, каждая из задач при этом может быть отнесена к одному из типов, при этом существует M различных типов задач. Тип задачи определяет ее потребности в комплексах обработки.

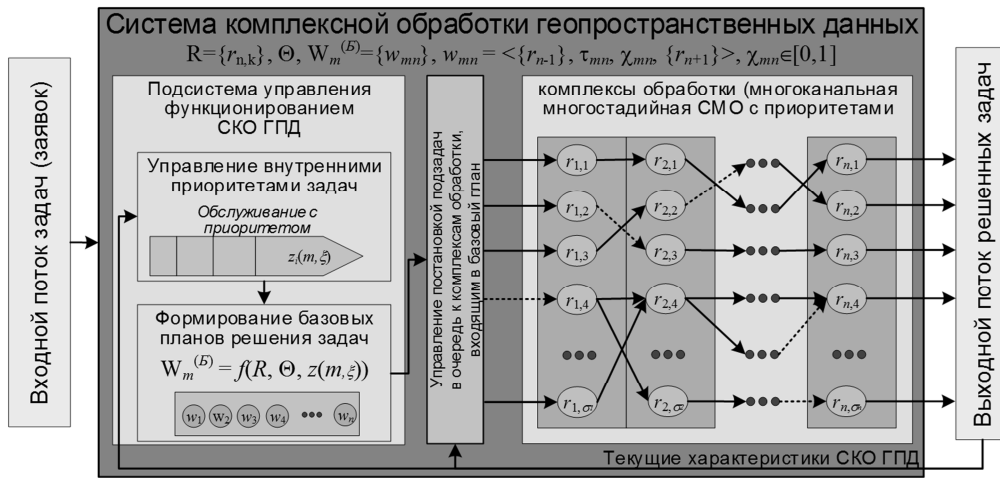


Рис. 1. Схема модели функционирования СКО ГПД в виде многоканальной многостадийной СМО с очередями, реализующими обслуживание с приоритетом

Положим, что потоки задач $z(t, m)$ всех типов на входе системы случайные и характеризуются показательными законами распределения числа поступающих на вход задач в единицу времени, т.е. функция распределения $F(t)$ промежутка времени t между моментами поступления двух задач одного типа определяется как

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{T_m}\right)}, \quad (1)$$

где T_m – среднее время между моментами поступления двух задач m -го типа.

Тот факт, что поток поступающих задач соответствует показательному закону распределения, адекватно отражает особенности реальных потоков задач, в которых наблюдается независимость прихода отдельных задач (из теории вероятностей известно [6], что наложение множества случайных потоков приводит к простейшему потоку с показательным законом).

Приспособленность СКО ГПД к выполнению возлагаемых на нее функций оценивается следующими показателями качества [7]: $R(t)$ – показатель полноты решения задач, т.е. взвешенная доля решенных задач за заданный период времени (отношение числа решенных задач к числу поступивших с учетом коэффициентов их относительных значимостей и полноты результатов решения); $O(t)$ – показатель оперативности решения задач, т.е. степень загруженности системы (отношение нормативного времени, выделяемого на решение всех поступивших задач в заданное время, к суммарному времени, которое затрачивается на их решение).

Показатель полноты решения задач определим следующим образом:

$$R(t) = \frac{\sum_i z_i^{(p)}(t, \xi, m, K^p)}{\sum_i z_i(t, \xi, m)}, \quad (2)$$

где i – количество задач, поступивших на временном интервале $[0, T]$, $i=1 \dots I, I$.

При этом i -тая поступившая задача z_i имеет следующие параметры: t – время поступления задачи, $t \in [0, T]$; ξ – коэффициент относительной значимости задачи, $\xi \in [0, T]$; m – тип задачи.

Кроме того, каждая решённая задача $z_i^{(p)}$ имеет дополнительный параметр $K^{(p)} \in [0,1]$, обозначающий степень «решенности» задачи. Учитывая тот факт, что параметры ξ и $K^{(p)}$ изменяются в диапазоне от 0 до 1, каждое значение $z_i^{(p)}(t, \xi, m, K^{(p)})$, используемое для расчета показателя $R(t)$, можно представить в виде $z_i^{(p)} = \xi \cdot K^{(p)}$, а каждое значение $z_i(t, \xi, m)$ – в виде $z_i = \xi$. При этом на итоговое значение показателя будут оказывать влияние только те z_i и $z_i^{(p)}$, которые имели место на рассматриваемом интервале $[0, T]$.

Если итоговое значение $R(t)$ значительно меньше единицы, то часть задач не будет выполнена за нормативное время. Рациональным считается, когда данный показатель принимает значение, близкое к единице, т.е. все задачи решаются за нормативное время, либо не решается только минимальное число низкоприоритетных (имеющих малый приоритет).

Показатель оперативности решения задач определим следующим образом:

$$O(t) = \frac{\sum_{m=1}^M T_m^{(H)}(t)}{\sum_{m=1}^M T_m^{(P)}(t)}, \quad (3)$$

где $T_m^{(H)}(t)$ – нормативное время, выделяемое на решение всего потока задач m -го типа;

$T_m^{(P)}(t)$ – время, которое было затрачено на решение всего потока задач m -го типа.

Если $O(t) < 1$, то очередь СМО растёт и часть задач не будет выполнена в срок. Если $O(t)$ значительно превышает единицу, то система является недогруженной и часть комплексов обработки будет простаивать. Очевидно, что чем меньше время, затрачиваемое на решение одной задачи, тем больше задач будет решено в заданный промежуток времени, т.е. увеличение значения показателя $O(t)$ опосредованно увеличивает значение $R(t)$.

Таким образом, разрабатываемая система управления функционированием СКО ГПД должна гарантировать такое распределение входящего потока заявок на решение задач по комплексам обработки, при котором обеспечивается рациональное (не ниже допустимого предела) значение интегрального показателя результативности, представляющего совокупность показателей полноты и оперативности, который характеризует взвешенную долю решённых *вовремя* задач.

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЕМ СИСТЕМЫ КОМПЛЕКСНОЙ ОБРАБОТКИ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ

Таким образом, увеличить значение показателя результативности функционирования СКО ГПД можно следующими двумя способами:

1) увеличить число решённых высокоприоритетных задач (т.е. не просто как можно быстрее решать поступающие задачи, а отдавать приоритет наиболее значимым);

2) увеличить полноту результатов решения для максимально возможного числа высокоприоритетных задач (т.е. не просто решить максимальное число высокоприоритетных задач вовремя, а задействовать при этом максимально возможное число необходимых для этого КО, т.е. решить с высоким качеством).

Данные способы имеют принципиальные отличия, которые заключаются в следующем. В случае следования по первому варианту, когда на вход системы слишком часто будут поступать задачи с более высоким уровнем приоритета, в условиях ресурсной ограниченности

часть задач с более низким приоритетом решена вовремя не будет. Однако при этом будет обеспечена максимальная полнота результатов решенных задач.

При следовании по второму варианту все задачи будут выполняться последовательно, и ситуация, когда какая-либо из задач не будет решена в принципе, возникнуть не сможет. При этом каждая из задач будет выполняться быстрее (за счет исключения недоступных КО из контура обработки), и тем самым общая оперативность решения задач будет повышаться, однако полнота полученных результатов решения будет ниже, чем при первом варианте.

Таким образом, первый способ в условиях ресурсной ограниченности СКО ГПД позволяет повысить значение показателя $R(t)$ за счет возрастания числа нерешенных, но низкоприоритетных задач, в то время как второй вариант в указанных условиях позволяет повысить значение показателя $O(t)$ за счет снижения полноты результатов решения задач.

Сформулируем следующие принципы управления функционированием СКО ГПД:

- 1) принцип приоритета оперативности решения поступающих задач;
- 2) принцип приоритета результативности решения поступающих задач.

Соблюдение принципа приоритета оперативности предполагает, что должна быть разработана критериальная база знаний, которая позволит принимать обоснованные решения по исключению недоступных КО из плана применения, обеспечивая при этом требуемый уровень полноты результатов решения задач.

Соблюдение принципа приоритета результативности предполагает, что необходимо разработать критериальную базу знаний, которая позволит принимать обоснованные решения по ранжированию задач в соответствии со значениями коэффициентов их относительных значимостей, обеспечивая при этом возможность решения (пусть и за рамками требуемых сроков исполнения) задач с относительно низким уровнем приоритета. При этом важно отметить, что в некоторых условиях, когда возможности СКО ГПД сильно ограничены, а число поступающих задач слишком велико, будет необходимо обеспечить соблюдение обоих принципов одновременно. В этом случае потребуется разработка соответствующей критериальной базы, которая обеспечит возможность как обоснованного ранжирования задач, так и обоснованного исключения недоступных КО из плана применения, обеспечивая при этом требуемый уровень полноты результатов.

Таким образом, функционирование СКО ГПД должно учитывать следующие критерии:

- 1) критерий достаточности полноты результатов решения задач (обеспечивает соблюдение принципа приоритета оперативности);
- 2) критерий приоритета задач с максимальной значимостью в плане применения КО (обеспечивает соблюдение принципа приоритета результативности);
- 3) критерий максимума производительности (позволяет учесть оба принципа сразу).

Для реализации указанных подходов предлагается концептуальная модель адаптивного управления функционированием СКО ГПД, схема которой представлена на рис. 2.

Основной идеей, которая заложена в этой модели, является переход к таким методам мониторинга, которые на основе, во-первых, адаптации к текущему состоянию объектов мониторинга (т.е. обоснованного определения наиболее значимых задач во входном потоке), во-вторых, адаптации к текущим ресурсным возможностям СКО ГПД (т.е. рационального распределения комплексов обработки по задачам) смогут обеспечить оптимизацию значений интегрального показателя результативности функционирования СКО ГПД.

Основу данной концептуальной модели составляет формализация семантической информации о системе взаимосвязанных объектов мониторинга и комплексов обработки, входящих в состав СКО ГПД, а также реализация их взаимосвязей в виде единой самообучаемой системы знаний, которая сможет предвидеть варианты развития ситуации и на их основе предлагать варианты реализации сценариев решения поступающих задач.

Новые знания должны получаться путем комплексирования разнородных ГПД, обрабатываемых различными территориально-распределенными комплексами обработки. Важной особенностью этого процесса является наличие настраиваемых условий их информационно-

го взаимодействия, в соответствии с которыми появление информации в одном из них порождает необходимость ее передачи в другие, а также запуска тех или иных процессов ее автоматизированной обработки или оповещения о ее появлении операторов. И таким образом формируется цепочка взаимосвязанных очередей обработки.

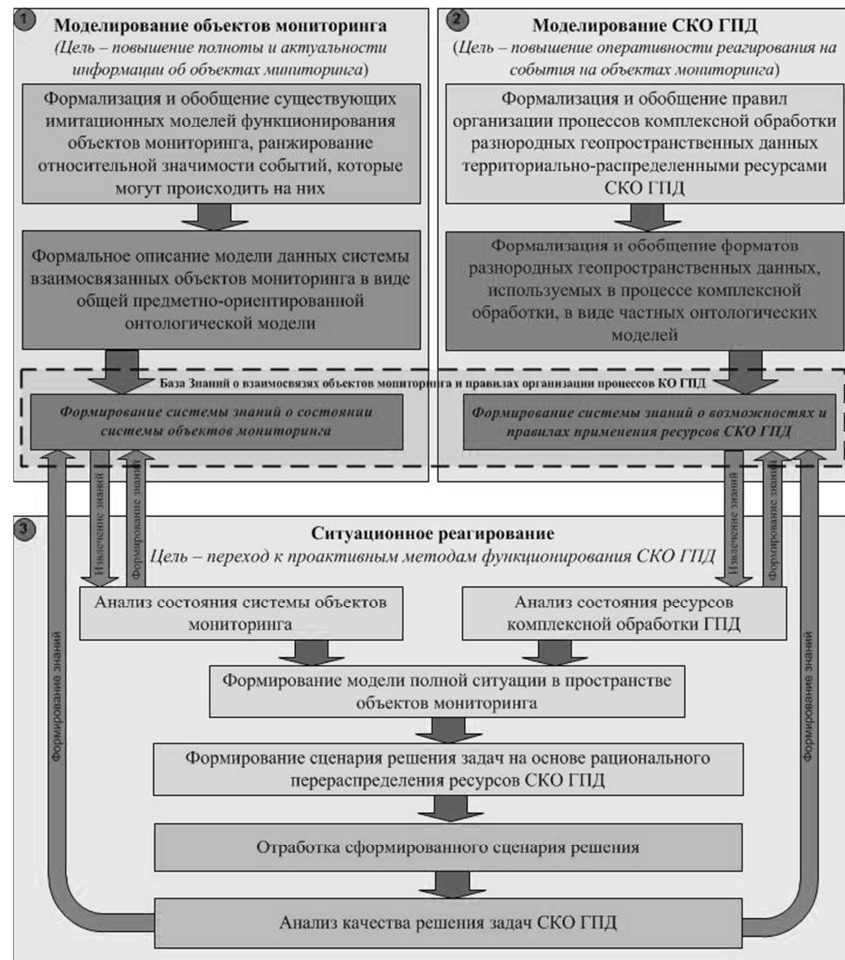


Рис. 2. Схема концептуальной модели адаптивного управления функционированием СКО ГПД

Можно утверждать, что на функционирование СКО ГПД будут оказывать влияние:

- объем знаний о состоянии системы взаимосвязанных объектов мониторинга;
- объем знаний о возможностях и правилах применения комплексов обработки, входящих в СКО ГПД;
- объем знаний о способах реагирования на типичные события на Ом;
- память о реакции на подобные ситуации в прошлом (самообучение).

МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЕМ СИСТЕМЫ КОМПЛЕКСНОЙ ОБРАБОТКИ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

В теории автоматизированного управления хорошо известны адаптивные системы управления с обратной связью, принципиальная схема которых представлена на рис. 3 [8].

Принцип адаптивного управления состоит в том, что характеристики устройства управления подстраиваются на основе текущих изменений свойств объекта. Целью адаптивной системы является оптимизация показателей качества функционирования объекта управления.

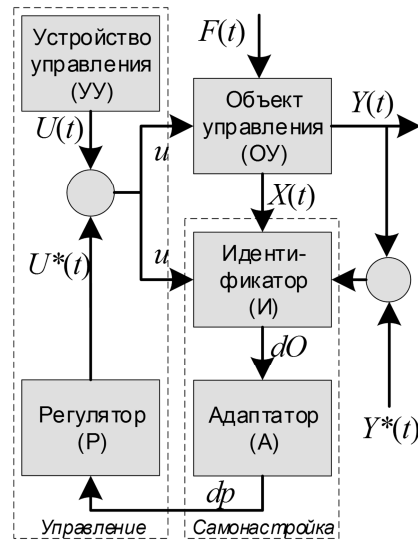


Рис. 3. Принципиальная схема адаптивных систем управления с обратной связью

При этом на схеме введены следующие обозначения: $F(t)$ – внешние условия (поступающие задачи); $U(t)$ – управляющие воздействия; $X(t)$ – состояние объекта управления (СКО ГПД); $Y(t)$ – управляемые величины (значения интегрального показателя результативности функционирования СКО ГПД и его компонентов); $Y^*(t)$ – целевые значения управляемых величин; $U^*(t)$ – управляющие воздействия, определяемые отклонением поведения объекта управления; dO – отклонения характеристик объекта управления; dp – вычисляемые параметры регулятора (Р).

Изменения значений управляемых величин объекта управления (ОУ) отслеживаются идентификатором (И), с выхода которого снимается информация в виде отклонения характеристик объекта управления (ОУ) dO , поступающего на блок адаптации (А). На основе этой информации блок адаптации вычисляет новые значения dp параметров регулятора (Р), который осуществляет дополнительное воздействие du на объект управления. В результате реализуется принцип обратной связи, т.е. образуется замкнутый контур передачи и обработки информации для компенсации параметрических возмущений среды.

Непосредственно для решения каждой задачи m -го типа $z_i(m)$ подсистемой управления функционированием СКО ГПД формируется базовый план ее решения $W_m^{(B)} = f(R, \Theta, z_i(m))$, включающий в свой состав требуемые КО разных типов, каждый из которых осуществляет выполнение одной или нескольких операций единого технологического цикла.

В состав вектора $W_m^{(B)}$ входят элементы w_{mn} , их физический смысл заключается в том, что они представляют собой четверку параметров вида: $w_{mn} = \langle \{r_{n-1}\}, \tau_{mn}, \chi_{mn}, \{r_{n+1}\} \rangle$, где $\{r_{n-1}\}$ – совокупность предыдущих КО в плане применения $W_m^{(B)}$; τ_{mn} – время, которое тратится соответствующим КО n -го типа на получение промежуточного результата решения своей подзадачи; χ_{mn} – степень вклада этого КО в интегральный результат решения всей задачи, при

этом сумма вкладов всех требуемых КО должна быть равна единице, т.е. $\sum_{n=1}^N \chi_{mn} = 1$; $\{r_{n+1}\}$ – совокупность последующих КО в плане применения $W_m^{(B)}$.

Важно отметить, что комплексы обработки могут решать свои подзадачи как параллельно, так и последовательно, при этом результаты работы одного КО могут являться исходными данными для других КО.

На рис. 4 представлена схема предлагаемой модели управления функционированием СКО ГПД на основе адаптивных систем с обратной связью.

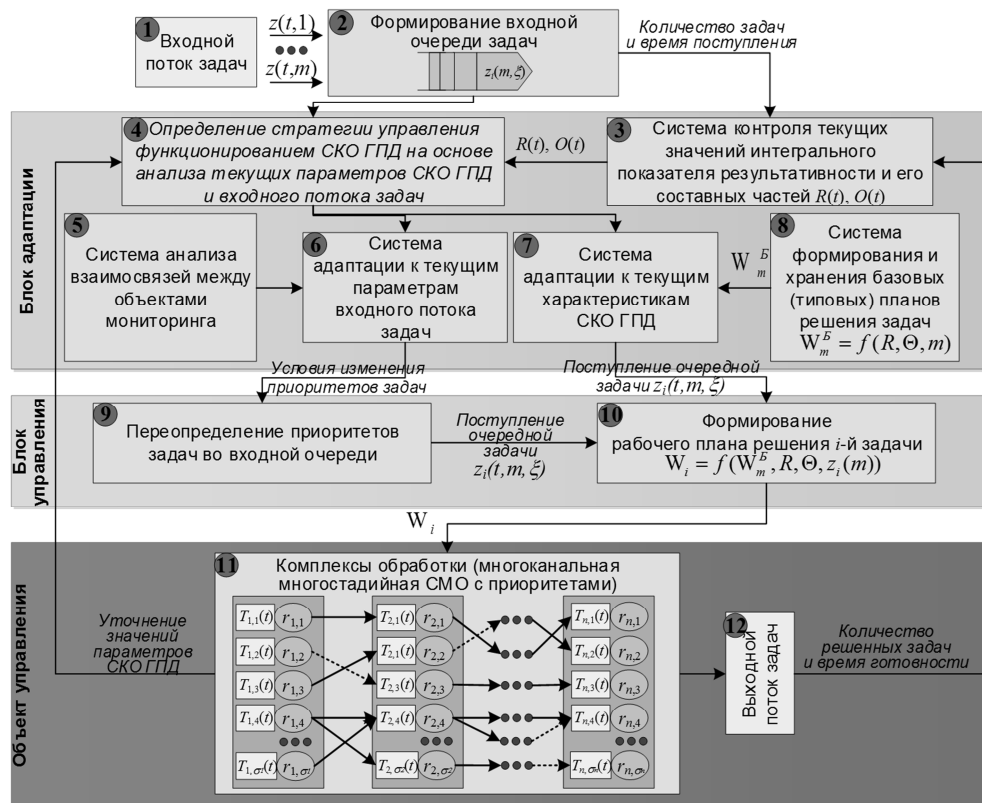


Рис. 4. Схема модели управления функционированием СКО ГПД на основе адаптивных систем с обратной связью

В блоке 1 модели генерируется входной поток задач, задаваемый формулой (1), который формирует исходную очередь задач (блок 2).

В блоке 2 фиксируется время поступления задач и текущая длина очереди, которые используются в качестве исходных данных в блоке 3 для контроля текущих значений показателей результативности и оперативности функционирования СКО ГПД.

В блоке 4 осуществляется принятие решения по выбору стратегии управления функционированием СКО ГПД на основе анализа текущих значений интегрального показателя результативности и его компонентов.

В случае принятия решения о необходимости адаптации СКО ГПД к параметрам входного потока задач на основе информации, хранящейся в подсистеме анализа взаимосвязей между объектами мониторинга (блок 5), осуществляется определение задач, связанных с поступившей, и вычисление максимального значения коэффициента относительной значимости среди них (блок 6), после чего осуществляется переход к процедуре переопределения приоритетов задач (блок 9). В частности, в данном блоке формируются условия изменения значений внутренних приоритетов поступающих задач, позволяющие вновь поступившую задачу переместить ближе к началу очереди. При этом внутренние приоритеты формируются на осно-

ве исходных коэффициентов относительных значимостей задач и внешних условий функционирования СКО ГПД (текущего состояния и взаимосвязей объектов мониторинга).

В случае принятия решения о необходимости адаптации СКО ГПД к текущим значениям ее внутренних параметров (блок 7) осуществляется переход к процедуре (блок 10) формирования рабочего плана решения поступившей i -й задачи, $W_i = f(W_m^{(B)}, R, \Theta, z_i(m))$, на основе базового плана $W_m^{(B)}$ (блок 8) с учетом текущих возможностей и загруженности требуемых комплексов обработки (параметры R и Θ). Сформированный рабочий план решения задачи поступает на вход блока 11, в котором осуществляется ее отработка, при этом параметры генерируемого выходного потока задач (блок 12) используются в качестве исходных данных в блоке 3 для контроля текущих значений показателей результативности и оперативности.

Среди внутренних параметров данной модели необходимо выделить вектор $X = \{x_m\}$, $m \in [1, M]$ – множество минимально требуемых значений вклада КО в интегральный результат решения задач разных типов. В случае, если текущее значение χ_{mn} коэффициента вклада комплекса обработки n -го типа меньше соответствующего значения x_m , то такой КО при необходимости может быть исключен из плана применения. Данный параметр может регулироваться в процессе функционирования модели.

Далее определим следующие параметры модели, которые задают общее время τ_{mn} , которое требуется комплексу обработки n -го типа для получения промежуточного результата решения задачи m -го типа, и зависят от текущего состояния и возможностей СКО ГПД:

$\tau_{mn}^{(1)}$ – время на получение исходных данных от предыдущего КО в плане W_i ;

$\tau_{mn}^{(2)}$ – время на подготовку исходных данных, требуемых для решения подзадачи;

$\tau_{mn}^{(3)}$ – время, непосредственно затрачиваемое комплексом обработки на решение своей подзадачи;

$\tau_{mn}^{(4)}$ – время на передачу своих результатов следующему КО в плане применения W_i .

Указанные параметры были введены и подробно рассмотрены в статье [7] при описании операционно-временной модели функционирования СКО ГПД. Полагается, что данные параметры не зависят от текущей загруженности системы.

Таким образом, общее время τ_{mn} , требуемое комплексу обработки для получения промежуточного результата решения своей подзадачи, определяется следующим выражением:

$$\tau_{mn} = \tau_{mn}^{(1)} + \tau_{mn}^{(2)} + \tau_{mn}^{(3)} + \tau_{mn}^{(4)}. \quad (4)$$

В свою очередь, время $\tau_m^{(P)}$, которое требуется для решения одной задачи m -го типа, определяется следующим выражением:

$$\tau_m^{(P)} = \sum_{n=1}^N \omega_{mn} \tau_{mn}, \quad (5)$$

где ω_{mn} – индикатор исключения КО n -го типа из плана решения задачи m -го типа,

$$\omega_{mn} = \begin{cases} 0, & \chi_{mn} \leq x_m \\ 1, & \chi_{mn} > x_m \end{cases}. \quad (6)$$

Стоит отметить, что для оценки времени, в целом затрачиваемого СКО ГПД на решение всего потока задач m -го типа, недостаточно просуммировать значения $\tau_m^{(P)}$. Это связано с тем, что в условиях ограниченности имеющихся комплексов обработки существует время ожидания их доступности, т.е. время нахождения задачи в очереди к данному КО.

Таким образом, суммарное время $T_m^{(P)}(t)$, которое затрачивается СКО ГПД на решение всего потока задач в заданное время, может быть определено следующим образом:

$$T_m^{(P)}(t) = z(t, m) \cdot \sum_{m=1}^N \omega_{mn} (\tau_{mn} + T_n(t)), \quad (7)$$

где $z(t, m)$ – количество поступивших задач m -го типа в заданное время, т.е. поток задач;

$T_n(t)$ – время ожидания доступности первого освободившегося КО n -го типа (нахождения задачи в очереди к системе имеющихся комплексов обработки n -го типа).

Анализ данной модели показывает, что увеличить значение интегрального показателя результативности функционирования СКО ГПД в целом и его компонентов в частности можно при помощи следующих подходов:

1) увеличения оперативности решения каждой из задач путем исключения из плана применения тех ресурсов, которые недоступны, но при этом вносят минимальный вклад в получение интегрального результата;

2) обеспечения приоритетного решения более важных задач.

Данный подход реализуется на основе алгоритма, представленного на рис. 5.

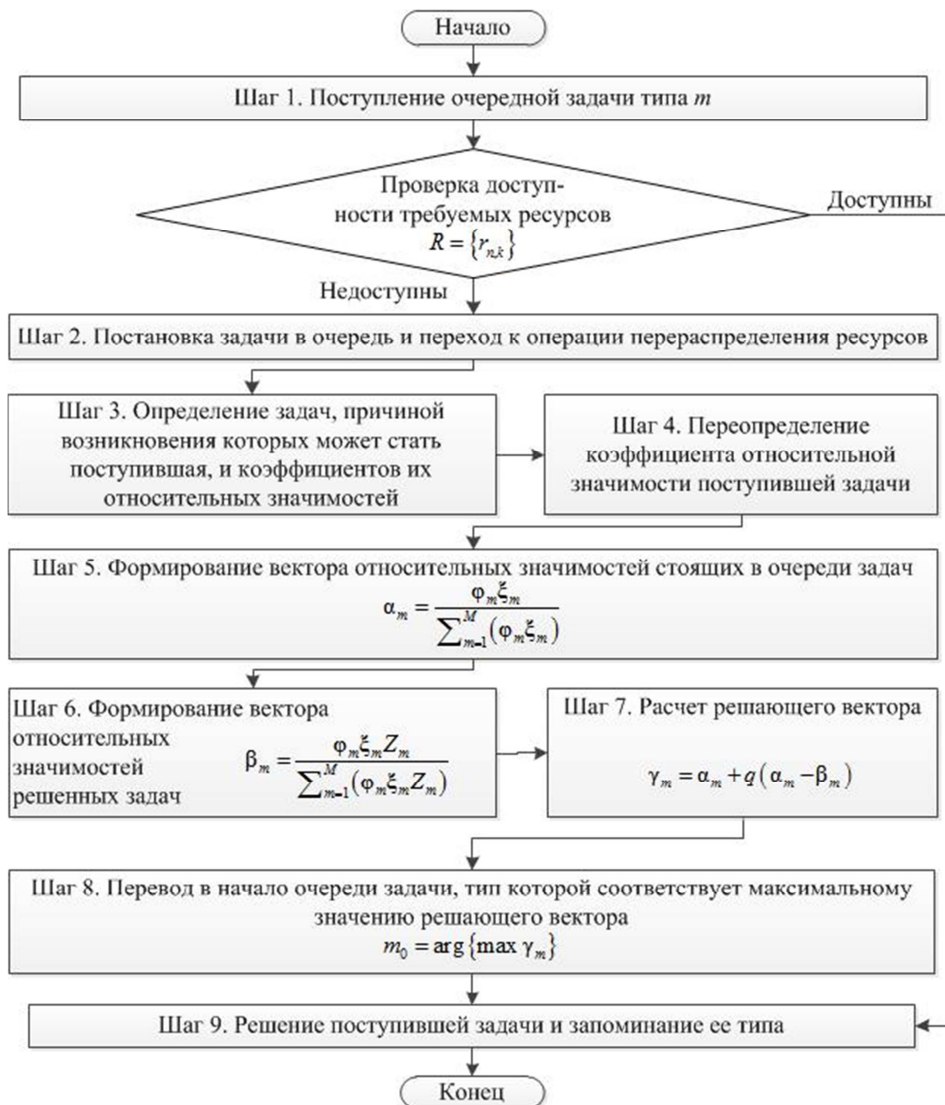


Рис. 5. Схема алгоритма переопределения приоритетов задач во входной очереди СКО ГПД

На шаге 1 осуществляется формирование задачи в СКО ГПД по реагированию на поступившую заявку, которой присваивается определенный тип m . Для начала решения этой зада-

чи необходимо, чтобы были доступны все требуемые для этого комплексы обработки. Если это условие выполняется, то осуществляется переход к шагу 9 и начинается решение поступившей задачи.

При поступлении сразу нескольких задач одного или разных типов, а также когда наблюдается нехватка одного или нескольких КО, производится переход к шагу 2 и осуществляется постановка сформированной задачи в общую очередь.

На шаге 3 осуществляется обращение к базе знаний и определяется перечень событий, которые могут возникнуть как следствие произошедшего события, по реагированию на которое сформирована рассматриваемая задача. Для этих событий определяются их приоритеты.

На шаге 4 осуществляется переопределение приоритета поступившей задачи, если хотя бы одно значение из определенных на предыдущем шаге приоритетов больше данного. В качестве нового значения присваивается максимальное из них.

Далее производится выбор задачи, к решению которой необходимо приступить в первую очередь, и осуществляется перераспределение требуемых комплексов обработки. Для этого на 5–7 шагах формируются три вектора (массива) показателей. Первый определяет относительные значимости α_m всех имеющихся в очереди задач на текущий момент времени:

$$\alpha_m = \frac{\varphi_m \xi_m}{\sum_{m=1}^M (\varphi_m \xi_m)}. \quad (8)$$

При этом φ_m определяется следующим образом: $\varphi_m = 0$, если задача m -го типа не присутствует в очереди; $\varphi_m = 1$, если задача m -го типа присутствует в очереди.

Сумма значимостей α_m всех находящихся в очередях задач нормирована на 1.

Далее определяются текущие значимости β_m всех задач, решенных к данному времени:

$$\beta_m = \frac{\varphi_m \xi_m z_m}{\sum_{m=1}^M (\varphi_m \xi_m z_m)}, \quad (9)$$

где z_m – общее количество решенных задач на текущий момент времени.

При определении β_m учитываются только типы задач, которые находятся в данный момент в очереди на входе в систему.

Наконец, вычисляется параметр γ_m , определяемый следующим образом:

$$\gamma_m = \alpha_m + q(\alpha_m - \beta_m), \quad (10)$$

где q – коэффициент обратной связи, деформирующий совокупность α_m значимостей задач на входе с учетом уже решенных задач, $0 \leq q \leq 1$.

Затем, на 8 шаге, из очереди выбирается задача того типа, который соответствует максимальному значению параметра γ_m :

$$m_0 = \arg \{ \max \gamma_m \}. \quad (11)$$

Параметр q является, наряду с X в формуле (6), одним из настраиваемых глобальных конфигурационных параметров управления СКО ГПД. Его физический смысл – уменьшить количество обрабатываемых задач некоторого типа, если количество уже решенных таких задач велико, и увеличить вероятность решения более редких задач.

Таким образом, обеспечивается сбалансированность потоков решаемых задач, но при этом гарантируется, что более важные задачи, решение которых вносит наиболее существенный вклад в конечное значение интегрального показателя результативности функционирования СКО ГПД, будут решаться в первую очередь.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализация рассмотренных моделей адаптивного управления позволит обоснованно, т.е. на основе разработанной критериальной базы, повысить результативность функционирования системы комплексной обработки геопространственных данных. Кроме того, данные модели могут быть применены и для других систем, обеспечивающих многоканальную многостадийную обработку потока задач в очередях, для которых существенным является обоснованное принятие верных управленческих решений в рамках жестких ресурсных ограничений.

Список используемых источников

1. *Карин С.А.* Интеграция в едином информационном пространстве разнородных геопространственных данных // Информационно-управляющие системы. – 2012. – № 2. – С. 89–94.
2. *Карин С.А., Бережной И.В.* Подходы к созданию перспективной системы комплексного мониторинга разнородных информационных ресурсов, имеющих геопространственную компоненту // Естественные и технические науки. – М.: Спутник+, 2016. – № 6. – С. 138–140.
3. *Карин С.А., Бережной И.В.* Технология обработки данных в сетевых системах сбора, обработки и анализа разнородной геопространственной информации // Естественные и технические науки. – М.: Спутник+, 2016. – № 6. – С. 141–143.
4. *Москвин Б.В.* Теория принятия решений: учебник. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2004. – 383 с.
5. *Москвин Б.В., Павлов А.Н., Петрошенко А.В.* Методы и технологии выработки управленческих решений: курс лекций: учеб.-метод. пособие. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2005. – 260 с.
6. *Вентцель Е.С., Овчаров Л.А.* Теория вероятностей и ее инженерные приложения. – 2-е изд. – М.: Высшая школа, 2000. – 480 с.
7. *Карин С.А.* Операционно-временная модель функционирования систем комплексной обработки геопространственных данных в условиях дефицита их ресурсов // Информационно-управляющие системы. – 2017. – № 2. – С. 51–57.
8. *Бесекерский В.А., Попов Е.П.* Теория систем автоматического управления – 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Профессия, 2003. – 752 с.

И.М. Кобзарев;
Е.В. Копкин,
доктор техн. наук, доцент

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕРЫ ЦЕННОСТИ ИНФОРМАЦИИ В.И. КОРОГОДИНА ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ГИБКИХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕДУР РАСПОЗНАВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ БОРТОВЫХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Предложен алгоритм построения гибкой диагностической процедуры, позволяющей распознавать техническое состояние объекта, учитывая полезность измерительной информации, получаемой в процессе проверок диагностических признаков, имеющих интервальную форму представления. Полезность диагностической информации определяется на основе использования меры ценности информации В.И. Корогодина, модифицированной применительно к задаче контроля и диагностирования. Приводится числовой пример реализации алгоритма.

Ключевые слова: техническое состояние, полезность диагностической информации, диагностический признак.

ВВЕДЕНИЕ

Для эффективного управления космическим аппаратом (КА) необходимо оперативно обрабатывать поступающие от его бортовых систем (БС) значительные потоки измерительной информации, большую часть которой можно назвать диагностической, и иметь достаточно высокую степень автоматизации процессов мониторинга и управления техническим состоянием (ТС).

Однако процессы мониторинга и управления ТС БС КА на практике автоматизированы лишь частично. Как правило, операторам наземного комплекса управления представляется диагностическая информация только о состоянии отдельных элементов БС, а не объекта контроля в целом. В связи с этим интегральную оценку ТС БС КА, а также формирование необходимых управляющих воздействий операторы выполняют в основном вручную, используя эвристические правила [1].

Различные свойства информации (в том числе диагностической), используемой для принятия и реализации управляющих воздействий, оказывают существенное влияние на эффективность процессов контроля и диагностирования БС КА.

Оценивание синтаксических свойств диагностической информации в настоящее время не вызывает существенных трудностей. Но для решения задач контроля и диагностирования особое значение имеет не столько количество диагностической информации, сколько ее ценность (полезность) для распознавания ТС. Однако процесс оценивания смысла и ценности информации является достаточно субъективным, что вызывает определенные трудности при формализации семантических свойств информации.

А.А. Харкевич предложил определять ценность информации через приращение вероятности достижения той цели, для которой данная информация используется [2]. Мера ценности информации определяется с помощью формулы

$$V = \log_2 \frac{P_1}{P_0},$$

где P_1 и P_0 представляют собой вероятности достижения цели после получения информации и до ее получения соответственно. Значение такой меры может изменяться в диапазоне от $-\infty$ до $+\infty$.

Показатель семантической полезности информации, сформированный на основе меры ценности А.А. Харкевича, был использован при разработке алгоритмов распознавания ТС объектов, описанных в ряде работ, например [3, 4].

В.И. Корогодина в работе [5] предложил другой подход к вычислению ценности информации, который в целом ряде случаев представляется более удобным. Формула, предложенная В.И. Корогодиным для вычисления ценности информации, имеет следующий вид:

$$V = \frac{P_1 - P_0}{1 - P_0}, \quad (1)$$

а значение такой меры ценности лежит в диапазоне от 0 до 1.

На основе модификации показателя (1) применительно к решению диагностических задач также разработаны алгоритмы анализа технического состояния объектов, например [6, 7], однако вычислительная сложность синтезируемых диагностических процедур достаточно большая из-за сложного и громоздкого процесса интерпретации вероятностей P_1 и P_0 . В связи с этим разработка более простого в вычислительном отношении алгоритма, позволяющего осуществлять распознавание ТС рассматриваемой БС КА путем выбора для проверок наиболее полезных (в смысле показателя ценности информации В.И. Корогодина) диагностических признаков, является актуальной и практически значимой задачей.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При формальной постановке задачи воспользуемся описанными в работе [8] агрегированными моделями объекта и процесса распознавания ТС, сохраняя принятые обозначения и используя интервальную форму представления диагностических признаков. В соответствии с этими моделями считаем, что контролируемая БС может находиться в одном из множества $S = \{S_i \mid i = \overline{1, m}\}$ заданных технических состояний, каждое из которых представляет собой либо исправное состояние в различных режимах работы объекта (при решении задачи контроля правильности функционирования), либо неисправное, вызванное отказом функционального элемента, с точностью до которого локализуется неисправность (при решении задачи диагностирования). Показатели (параметры), содержащие информацию, необходимую для распознавания ТС объекта, образуют множество $\Pi = \{\pi_j \mid j = \overline{1, n}\}$. Также задано множество $L = \{l_{ij} \mid i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}\}$ диагностических признаков в виде интервалов на шкале показателей (параметров) $\pi_j \in \Pi$, обеспечивающих попарную различимость всех ТС $S_i \subseteq S$. Измерительная информация, поступающая от БС, фиксируется с помощью зарегистрированных значений y_j соответствующих параметров $\pi_j \in \Pi$, которые являются равномерно распределенными по заданным интервалам l_{ij} вещественными числами.

Модель процесса распознавания ТС также содержит в своем составе ряд множеств. Одним из них является множество $\hat{\Pi} = \{\hat{\pi}_j \mid j = \overline{1, n}\}$ проверок соответствующих параметров $\pi_j \in \Pi$. Каждая проверка заключается в измерении текущего значения y_j соответствующего параметра $\pi_j \in \Pi$ и выявлении принадлежности этого значения одному или нескольким интервалам $l_{ij} \in L$ (в случае их пересечения).

Кроме технических состояний S_i ($i = \overline{1, m}$), подлежащих распознаванию, будем рассматривать информационные состояния (ИС) процесса распознавания этих ТС, образующие множе-

ство $\Omega = \{R_k \mid R_k \subseteq S, k = \overline{1, M}\}$, элементы которого различаются по их мощности. Одноэлементные множества $R_i = \{S_i\}$, $i = \overline{1, m}$, являются конечными ИС и представляют собой распознанные ТС. Информационные состояния $R_k \subseteq S$, для которых $2 \leq \text{card}\{R_k\} \leq m$, являются неконечными и физически означают подмножества множества технических состояний, в одном из которых с некоторой вероятностью может находиться БС в момент определения ее состояния.

Поскольку всякое подмножество $R_k \subseteq S$ характеризует степень неопределенности распознаваемого ТС, введем в рассмотрение множество $P = \{P(R_k) \mid R_k \in \Omega\}$ вероятностей ИС, заданных множеством Ω , используемых в случайном процессе выбора последовательности проверок, необходимых для распознавания ТС объекта.

При попадании измеренного значения y_j параметра $\pi_j \in \Pi$ в один из подынтервалов $\Delta_{kj} = \bigcap_{\{i: S_i \in R_k\}} l_{ij}$ происходит событие, которое называется исходом проверки $\hat{\pi}_j \in \hat{\Pi}$, выполняемой в ИС R_k . Число ω_{kj} возможных исходов проверки определяется числом таких подынтервалов.

Каждому подынтервалу Δ_{kj} присвоим порядковый номер v , т.е. введем обозначение $\Delta_{kj}^v = \bigcap_{\{i: S_i \in R_{kj}^v\}} l_{ij}$. Событие $(y_j \in \Delta_{kj}^v)$, $v = \overline{1, \omega_{kj}}$, будем рассматривать как v -й исход проверки $\hat{\pi}_j$, обозначаемый $\hat{\pi}_j^v$.

Тогда результат выполнения проверки $\hat{\pi}_j$ можно рассматривать как отображение

$$\hat{\pi}_j : R_k \rightarrow R_{kj}^v, \text{ если } y_j \in \Delta_{kj}^v \left(v = \overline{1, \omega_{kj}} \right), \quad (2)$$

где

$$R_{kj}^v = \left\{ S_i \in R_k \mid \bigcap_{\{i: S_i \in R_{kj}^v\}} l_{ij} \neq \emptyset \right\}; \bigcup_{v=1, \omega_{kj}} R_{kj}^v = R_k.$$

Иначе говоря, каждый из исходов $\hat{\pi}_j^v$ – это новое ИС R_{kj}^v , у которого $\text{card}\{R_{kj}^v\} < \text{card}\{R_k\}$.

Вероятность $P_k(\hat{\pi}_j^v)$ исхода проверки $\hat{\pi}_j$, выполненной в ИС R_k , представляет собой условную вероятность перехода из ИС R_k в ИС R_{kj}^v и вычисляется по формуле

$$P_k(\hat{\pi}_j^v) = P(R_{kj}^v / R_k) = \frac{|\Delta_{kj}^v|}{|\nabla_{kj}|}, \quad (3)$$

где $|\Delta_{kj}^v|$, $|\nabla_{kj}|$ – длины пересечения и объединения соответствующих подынтервалов,

$$|\Delta_{kj}^v| = \left| \bigcap_{\{i: S_i \in R_{kj}^v\}} l_{ij} \right|, \quad |\nabla_{kj}| = \left| \bigcup_{\{i: S_i \in R_k\}} l_{ij} \right|.$$

Для каждого ИС $R_k \subseteq S$ можно определить так называемое множество $\hat{\Pi}_k$ допустимых проверок, определяемое из условия

$$\hat{\pi}_j \in \hat{\Pi}_k, \text{ если } (\exists S_i, S_f \in R_k) : (l_{ij} \cap l_{ff} = \emptyset), \quad (4)$$

т.е. если найдутся хотя бы два ТС $S_i, S_f \in R_k$, которым соответствуют непересекающиеся интервалы $l_{ij}, l_{ff} \in L$, то проверка $\hat{\pi}_j \in \hat{\Pi}$ будет допустима для выполнения в ИС R_k .

Для удобства будем представлять процесс распознавания ТС БС в виде ориентированного графа G , вершинами которого являются ИС R_k , а дугами – исходы $\hat{\pi}_j^v$ проверок в этих состояниях. Граф G имеет одну начальную вершину $R_k = S$ и m конечных вершин $R_i = \{S_i\}$, соот-

ветствующих опознанным ТС БС, и состоит из r ветвей G_r . При интервальном задании диагностических признаков количество этих ветвей может значительно превосходить число m распознаваемых ТС, т.е. в одно ТС $S_i \in S$ может приходиться несколько ветвей G_r .

При указанных условиях для распознавания каждого из ТС $S_i \in S$ ($i = \overline{1, m}$) требуется найти упорядоченное по очередности выполнения подмножество проверок $\hat{\Pi}_r \subseteq \hat{\Pi}$, удовлетворяющее условию

$$\hat{\Pi}_r = \left\{ \hat{\pi}_j \mid \hat{\pi}_j \in \hat{\Pi} : \forall S_i \in S, \forall S_f \in S \setminus \{S_i\}, l_{ij} \cap l_{jf} = \emptyset \right\}. \quad (5)$$

Последовательное выполнение проверок, входящих в каждое из найденных подмножеств $\hat{\Pi}_r \subseteq \hat{\Pi}$, обеспечивает переход от начального ИС $R_k = S$ к каждому из ТС $S_i \in S$ ($i = \overline{1, m}$) в соответствии с выражением

$$\prod_{\hat{\pi}_j \in \hat{\Pi}_r} \hat{\pi}_j : S \rightarrow S_i \quad (i = \overline{1, m}), \quad (6)$$

где $\prod_{\hat{\pi}_j \in \hat{\Pi}_r} \hat{\pi}_j$ – композиция отображений (2), соответствующих отдельным проверкам.

Также необходимо, чтобы диагностическая информация, получаемая при выполнении проверок, входящих в найденные подмножества $\hat{\Pi}_r$, обладала наибольшей полезностью для достижения цели, т.е. для определения ТС, в котором находится БС.

Гибкая диагностическая процедура (ГДП) представляет собой совокупность множества проверок $\hat{\Pi}^* = \bigcup_r \hat{\Pi}_r$ и правил, определяющих их выполнение, предназначенную для распознавания каждого из возможных ТС $S_i \in S$ ($i = \overline{1, m}$). При реализации ГДП обеспечивается достижение наибольшего в среднем значения показателя полезности получаемой диагностической информации, рассчитываемого на основе использования меры ценности информации В.И. Корогодина (1).

ВЫЧИСЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПОЛЕЗНОСТИ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Осуществим модификацию меры ценности информации (1) таким образом, чтобы сформированный показатель полезности диагностической информации можно было в дальнейшем использовать для выбора наиболее «полезных» проверок в процессе распознавания ТС БС.

Как уже отмечалось, основными элементами ГДП являются информационные состояния и выполняемые в них проверки. Будем рассматривать обладающее некоторой неопределенностью ИС $R_k \in \Omega$ (кроме конечных ИС $R_i = \{S_i\}$, $i = \overline{1, m}$) как отдельный источник информации, а проверку $\hat{\pi}_j$, выполняемую в нем – как средство ее получения.

Исходы $\hat{\pi}_j^v$ ($v = \overline{1, \omega_{kj}}$), получаемые в результате выполнения проверки $\hat{\pi}_j$ в ИС R_k , согласно отображению (2) являются случайными событиями. В силу этой случайности можно рассмотреть ω_{kj} конкурирующих гипотез относительно вновь получаемых ИС. Обозначим эти гипотезы через R_{kj}^u ($u = \overline{1, \omega_{kj}}$), а вероятности реализации гипотетических ИС – через $P_k(\hat{\pi}_j^u)$ и будем рассматривать их как априорные вероятности достижения цели до получения информации, т.е. до выполнения проверки.

После выполнения проверки $\hat{\pi}_j$, т.е. после получения информации, исходная неопределенность, содержащаяся в ИС R_k , уменьшается и с апостериорной вероятностью $P_k(\hat{\pi}_j^v)$ достижения цели получается новое ИС $R_{kj}^v (v = \overline{1, \omega_{kj}})$.

Если в качестве основной гипотезы выбрана R_{kj}^u , а в результате исхода выполняемой проверки получилось ИС R_{kj}^v , то полезность $V_k(\hat{\pi}_j^{v,u})$ получаемой при этом диагностической информации можно оценить в соответствии с (1) следующим образом:

$$V_k(\hat{\pi}_j^{v,u}) = \frac{P_k(\hat{\pi}_j^v) - P_k(\hat{\pi}_j^u)}{1 - P_k(\hat{\pi}_j^u)} (v, u = \overline{1, \omega_{kj}}). \quad (7)$$

При этих условиях основная гипотеза R_{kj}^u может подтвердиться (если $u = v$) с вероятностью $P_k(\hat{\pi}_j^v)$ или может быть отклонена (если $u \neq v$) с той же вероятностью в пользу любой из других гипотез. В зависимости от того, какой исход $\hat{\pi}_j^v$ будет иметь выполняемая проверка и какая из гипотез R_{kj}^u была принята в качестве основной, величина показателя $V_k(\hat{\pi}_j^{v,u})$, определяемого выражением (7), будет различной. Это согласуется с утверждением В.И. Корогодина [5] о том, что по отношению к разным парам «цель – результат» ценность любой информации может изменяться в широких пределах.

Проверка $\hat{\pi}_j$, выполненная в ИС R_k , несет информацию, среднее значение полезности которой $V_k(\hat{\pi}_j)$ можно вычислить по формуле

$$V_k(\hat{\pi}_j) = \sum_{v=1}^{\omega_{kj}} \sum_{u=1}^{\omega_{kj}} P_k(\hat{\pi}_j^v) V_k(\hat{\pi}_j^{v,u}) = \sum_{v=1}^{\omega_{kj}} P_k(\hat{\pi}_j^v) \sum_{u=1}^{\omega_{kj}} V_k(\hat{\pi}_j^{v,u}). \quad (8)$$

В соответствии с этой формулой сначала по числу ω_{kj} априорных гипотез R_{kj}^u суммируются значения показателей (7), взвешенные вероятностями $P_k(\hat{\pi}_j^v)$, а потом осуществляется суммирование по такому же числу исходов проверки.

Введем в рассмотрение два вектора и матрицу:

$$P_{kj\langle\omega_{kj}\rangle} = \left[P_k(\hat{\pi}_j^1) \quad P_k(\hat{\pi}_j^2) \quad \dots \quad P_k(\hat{\pi}_j^{\omega_{kj}}) \right]^T; \quad (9)$$

$$Q_{kj\langle\omega_{kj}\rangle} = \left[\frac{1}{1 - P_k(\hat{\pi}_j^1)} \quad \frac{1}{1 - P_k(\hat{\pi}_j^2)} \quad \dots \quad \frac{1}{1 - P_k(\hat{\pi}_j^{\omega_{kj}})} \right]^T; \quad (10)$$

$$P_{kj[\omega_{kj}]} = \begin{bmatrix} P_k(\hat{\pi}_j^1) - P_k(\hat{\pi}_j^1) & P_k(\hat{\pi}_j^1) - P_k(\hat{\pi}_j^2) & \dots & P_k(\hat{\pi}_j^1) - P_k(\hat{\pi}_j^{\omega_{kj}}) \\ P_k(\hat{\pi}_j^2) - P_k(\hat{\pi}_j^1) & P_k(\hat{\pi}_j^2) - P_k(\hat{\pi}_j^2) & \dots & P_k(\hat{\pi}_j^2) - P_k(\hat{\pi}_j^{\omega_{kj}}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_k(\hat{\pi}_j^{\omega_{kj}}) - P_k(\hat{\pi}_j^1) & P_k(\hat{\pi}_j^{\omega_{kj}}) - P_k(\hat{\pi}_j^2) & \dots & P_k(\hat{\pi}_j^{\omega_{kj}}) - P_k(\hat{\pi}_j^{\omega_{kj}}) \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Тогда путем несложных математических преобразований формулу (8) можно представить в векторно-матричном виде:

$$V_k(\hat{\pi}_j) = P_{kj\langle\omega_{kj}\rangle}^T P_{kj[\omega_{kj}]} Q_{kj\langle\omega_{kj}\rangle}. \quad (12)$$

Поскольку, по мнению В. И. Корогодина [5], принцип аддитивности неприменим к показателю ценности информации (1), то на основе показателя (12) нельзя построить оптималь-

ную ГДП методом динамического программирования, как это было выполнено, например, в работе [3] при использовании показателя полезности информации А.А. Харкевича. Однако возможно построить ГДП, используя последовательный метод выполнения проверок, начиная от ИС $R_k = S$ и заканчивая конечными состояниями $R_i = \{S_i\}$, $i = \overline{1, m}$. При этом в процессе поиска подмножеств проверок $\hat{\Pi}_r \subseteq \hat{\Pi}$, удовлетворяющих условию (5) и входящих в состав композиции отображений (6), осуществляется вычисление показателя (12) для каждого из рассматриваемых ИС R_k по множеству $\hat{\Pi}_k$ допустимых в нем проверок. Наилучшая для ИС R_k проверка $\hat{\pi}_j$ (в смысле полезности получаемой при ее выполнении диагностической информации) определяется из условия

$$\hat{\pi}_j = \arg \max_{\hat{\pi}_s \in \hat{\Pi}_k} \{V_k(\hat{\pi}_s)\}. \quad (13)$$

Предлагаемый подход к оцениванию полезности диагностической информации имеет ограничение, которое необходимо учитывать при построении ГДП. Оно связано с тем, что в случае, когда проверка $\hat{\pi}_j$, выполняемая в произвольном информационном состоянии R_k , имеет всего два исхода ($\omega_{kj} = 2$), то полезность получаемой информации, вычисляемая по формуле (12), становится равной нулю. В рамках рассматриваемой модели такая ситуация возникает, например, когда $\text{card}\{R_k\} = 2$. В этих случаях в качестве наилучшей проверки следует выбирать такую, которая в наибольшей степени снижает исходную неопределенность анализируемого информационного состояния. Иначе говоря, вместо условия (13) необходимо использовать условие

$$\hat{\pi}_j = \arg \max_{\hat{\pi}_s \in \hat{\Pi}_k} \{I_k(\hat{\pi}_s)\}, \quad (14)$$

где $I_k(\hat{\pi}_s)$ – количество информации, получаемой при выполнении проверки $\hat{\pi}_s$ в ИС R_k ,

$$I_k(\hat{\pi}_s) = \sum_{v=1}^{\omega_{ks}} P_k(\hat{\pi}_s^v) [-\log_2 P_k(\hat{\pi}_s^v)]. \quad (15)$$

Каждая из ветвей G_r построенной ГДП представляет собой композицию проверок $\hat{\pi}_j \in \hat{\Pi}_r$, необходимых для распознавания ТС S_i ($i = \overline{1, m}$), начиная от исходного ИС $R_k = S$, причем каждая из этих проверок обладает наибольшим значением показателя полезности диагностической информации.

Предложенный математический аппарат будет справедлив при использовании не только интервальных, но и многозначных (за исключением бинарных) диагностических признаков. При этом изменятся отдельные формулы. В частности, для вычисления вероятностей исходов проверок вместо формулы (3) будет использоваться формула

$$P_k(\hat{\pi}_j^v) = \frac{P(R_{kj}^v)}{P(R_k)} = \frac{\sum_{S_i \in R_{kj}^v} P(S_i)}{\sum_{S_i \in R_k} P(S_i)}, \quad v = \overline{1, \omega_{kj}},$$

где $P(S_i)$ – вероятности ТС S_i , которые должны быть заданы, $i = \overline{1, m}$.

Формула (12) преобразуется к виду

$$V_k(\hat{\pi}_j) = \frac{1}{P(R_k)} P_{R_{kj}(\omega_{kj})}^T \mathbf{P}_{R_{kj}[\omega_{kj}]} \mathcal{Q}_{R_{kj}(\omega_{kj})},$$

а множители, входящие в ее состав, определяются соответственно из выражений:

$$P_{R_{kj}(\omega_{kj})} = \left[P(R_{kj}^1) \quad P(R_{kj}^2) \quad \dots \quad P(R_{kj}^{\omega_{kj}}) \right]^T;$$

$$Q_{R_{kj}\langle\omega_{kj}\rangle} = \left[\frac{1}{P(R_k) - P(R_{kj}^1)} \quad \frac{1}{P(R_k) - P(R_{kj}^2)} \quad \dots \quad \frac{1}{P(R_k) - P(R_{kj}^{\omega_{kj}})} \right]^T;$$

$$P_{R_{kj}\langle\omega_{kj}\rangle} = \begin{bmatrix} P(R_{kj}^1) - P(R_{kj}^1) & P(R_{kj}^1) - P(R_{kj}^2) & \dots & P(R_{kj}^1) - P(R_{kj}^{\omega_{kj}}) \\ P(R_{kj}^2) - P(R_{kj}^1) & P(R_{kj}^2) - P(R_{kj}^2) & \dots & P(R_{kj}^2) - P(R_{kj}^{\omega_{kj}}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P(R_{kj}^{\omega_{kj}}) - P(R_{kj}^1) & P(R_{kj}^{\omega_{kj}}) - P(R_{kj}^2) & \dots & P(R_{kj}^{\omega_{kj}}) - P(R_{kj}^{\omega_{kj}}) \end{bmatrix}.$$

Если же диагностические признаки будут иметь бинарную форму представления, то для построения ГДП следует использовать подход, описанный в работе [6].

АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ ГИБКОЙ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ ПРОЦЕДУРЫ

Построение ГДП заключается в последовательном выполнении ряда шагов.

Шаг 1. Выполним проверку $\hat{\pi}_j \in \hat{\Pi}_k$ в исходном ИС $R_k = S$, для которого в соответствии с условием (4) все проверки являются допустимыми, получим ее возможные исходы R_{kj}^v ($v = \overline{1, \omega_{kj}}$) и определим их вероятности $P_k(\hat{\pi}_j^v)$. ИС R_{kj}^v получим в соответствии с отображением (2), а вероятности $P_k(\hat{\pi}_j^v)$ вычислим по формуле (3).

Шаг 2. Сформируем вектор $P_{kj\langle\omega_{kj}\rangle}$ по формуле (9); вектор $Q_{kj\langle\omega_{kj}\rangle}$ по формуле (10); матрицу $P_{kj\langle\omega_{kj}\rangle}$ по формуле (11).

Шаг 3. Вычислим, используя формулу (12), значение показателя $V_k(\hat{\pi}_j)$ полезности диагностической информации, получаемой при выполнении проверки $\hat{\pi}_j$ в исходном состоянии $R_k = S$.

Шаг 4. Выполним шаги 1, 2 и 3 для оставшихся проверок $\hat{\pi}_s \in \hat{\Pi}_k \setminus \{\hat{\pi}_j\}$ в исходном ИС $R_k = S$ и рассчитаем значения показателей полезности $V_k(\hat{\pi}_s)$.

Шаг 5. Выберем для исходного ИС $R_k = S$ проверку $\hat{\pi}_j$, при выполнении которой соблюдается условие (13).

Шаг 6. Выполним шаги 1–5 для каждого из исходов $R_{kj}^v \neq R_i$ проверки $\hat{\pi}_j$, выбранной на шаге 5, рассматривая каждый из них как новое исходное ИС $R_k \subset S$, имеющее множество допустимых проверок $\hat{\Pi}_k$, и определим для них по условию (13) наиболее «полезные» проверки. В случае, когда $\text{card}\{R_{kj}^v\} = 2$, для выбора наилучшей проверки следует использовать результаты расчетов по формуле (15) и условие (14).

Шаг 7. При достижении всех конечных состояний $R_i = \{S_i\}$, $i = \overline{1, m}$, завершим вычисления.

Шаг 8. Построим ГДП в виде ориентированного графа G . Сформируем все упорядоченные подмножества $\hat{\Pi}_r$, задающие состав и очередность выполнения проверок $\hat{\pi}_j \in \hat{\Pi}$ для распознавания заданных ТС $S_i \in S$ ($i = \overline{1, m}$) БС.

ПРИМЕР РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМА

Для иллюстрации процесса построения гибкой диагностической процедуры с помощью разработанного алгоритма рассмотрим числовой пример, аналогичный представленному в работе [7]. Будем считать заданными в виде табл. 1 множества $S = \{S_i | i = \overline{1,5}\}$, $\Pi = \{\pi_j | j = \overline{1,5}\}$ и $L = \{l_{ij} | i = \overline{1,5}; j = \overline{1,5}\}$.

Таблица 1

Таблица состояний

ТС S_i	Диагностические признаки π_j				
	π_1	π_2	π_3	π_4	π_5
S_1	(0,0; 0,4)	(0,2; 0,5)	(0,1; 0,3)	(0,0; 0,5)	(0,5; 1,0)
S_2	(0,2; 0,6)	(0,7; 1,0)	(0,3; 0,8)	(0,2; 0,6)	(0,0; 0,3)
S_3	(0,5; 0,8)	(0,0; 0,4)	(0,6; 1,0)	(0,4; 0,6)	(0,6; 0,8)
S_4	(0,6; 1,0)	(0,2; 0,7)	(0,4; 0,8)	(0,7; 1,0)	(0,3; 0,5)
S_5	(0,3; 0,5)	(0,6; 0,8)	(0,0; 0,3)	(0,5; 0,7)	(0,3; 0,7)

Решение.

Шаг 1. Выполним в соответствии с отображением (2) проверку $\hat{\pi}_1$ в исходном ИС R_{1-5} и получим ее возможные исходы, представленные на рис. 1:

$$\hat{\pi}_1 : R_{1-5} \rightarrow \begin{cases} R_{1-5;1}^1 = \{S_1\}, \text{ если } y_1 \in (0, 0; 0, 2) = \Delta_{1-5;1}^1; \\ R_{1-5;1}^2 = \{S_1, S_2\}, \text{ если } y_1 \in (0, 2; 0, 3) = \Delta_{1-5;1}^2; \\ R_{1-5;1}^3 = \{S_1, S_2, S_5\}, \text{ если } y_1 \in (0, 3; 0, 4) = \Delta_{1-5;1}^3; \\ R_{1-5;1}^4 = \{S_2, S_5\}, \text{ если } y_1 \in (0, 4; 0, 5) = \Delta_{1-5;1}^4; \\ R_{1-5;1}^5 = \{S_2, S_3\}, \text{ если } y_1 \in (0, 5; 0, 6) = \Delta_{1-5;1}^5; \\ R_{1-5;1}^6 = \{S_3, S_4\}, \text{ если } y_1 \in (0, 6; 0, 8) = \Delta_{1-5;1}^6; \\ R_{1-5;1}^7 = \{S_4\}, \text{ если } y_1 \in (0, 8; 1, 0) = \Delta_{1-5;1}^7. \end{cases}$$

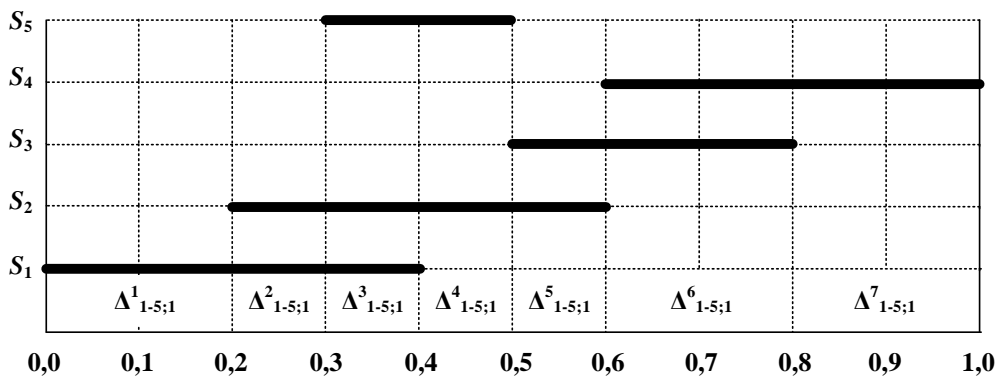


Рис.1. Возможные исходы проверки $\hat{\pi}_1$ в ИС R_{1-5}

Определим вероятности этих исходов по формуле (3):

$$|\nabla_{1-5;1}| = \left| \bigcup_{i=1}^5 \ell_{i1} \right| = 1, 0; \quad P_{1-5}(\hat{\pi}_1^v) = \frac{|\Delta_{1-5;1}^v|}{|\nabla_{1-5;1}|} = \begin{cases} 0, 1 (v = \overline{2, 5}); \\ 0, 2 (v = \{1; 6; 7\}). \end{cases}$$

Шаг 2. Сформируем, используя формулы (9), (10) и (11), векторы $P_{1-5;1(7)}$, $Q_{1-5;1(7)}$ и матрицу $P_{1-5;1[7]}$:

$$P_{1-5;1(7)} = [0,2 \quad 0,1 \quad 0,1 \quad 0,1 \quad 0,1 \quad 0,2 \quad 0,2]^T;$$

$$Q_{1-5;1(7)} = [1,25 \quad 1,11 \quad 1,11 \quad 1,11 \quad 1,11 \quad 1,25 \quad 1,25]^T;$$

$$P_{1-5;1[7]} = \begin{bmatrix} 0 & 0,1 & 0,1 & 0,1 & 0,1 & 0 & 0 \\ -0,1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,1 & -0,1 \\ -0,1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,1 & -0,1 \\ -0,1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,1 & -0,1 \\ -0,1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,1 & -0,1 \\ 0 & 0,1 & 0,1 & 0,1 & 0,1 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1 & 0,1 & 0,1 & 0,1 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Шаг 3. Подставим полученные данные в формулу (12) и вычислим значение показателя $V_{1-5}(\hat{\pi}_1)$ полезности диагностической информации, получаемой при выполнении проверки $\hat{\pi}_1$ в исходном состоянии R_{1-5} :

$$V_{1-5}(\hat{\pi}_1) = P_{1-5;1(7)}^T P_{1-5;1[7]} Q_{1-5;1(7)} = 0,117.$$

Шаг 4. Выполним шаги 1, 2 и 3 применительно к проверкам $\hat{\pi}_s$ ($s = \overline{2, 5}$) для исходного ИС R_{1-5} и рассчитаем соответствующие значения показателей полезности $V_{1-5}(\hat{\pi}_s)$:

$$V_{1-5}(\hat{\pi}_2) = 0,117; V_{1-5}(\hat{\pi}_3) = 0,078; V_{1-5}(\hat{\pi}_4) = 0,191; V_{1-5}(\hat{\pi}_5) = 0,191.$$

Шаг 5. В соответствии с условием (13) наибольшей полезностью в исходном ИС R_{1-5} обладают проверки $\hat{\pi}_4$ и $\hat{\pi}_5$. Выберем проверку $\hat{\pi}_4$, так как она дает большее число конечных исходов, т.е. цель процесса распознавания ТС достигается быстрее.

Шаг 6. Определим для каждого из неконечных исходов проверки $\hat{\pi}_4$, выполненной в ИС R_{1-5} , которыми являются $R_{1-5;4}^2 = \{S_1, S_2\} = R_{1,2}$, $R_{1-5;4}^3 = \{S_1, S_2, S_3\} = R_{1,2,3}$ и $R_{1-5;4}^4 = \{S_2, S_3, S_5\} = R_{2,3,5}$, наиболее «полезные» проверки.

Поскольку ИС $R_{1,2}$ имеет в своем составе только два ТС, то, как отмечено выше, для выбора наилучшей проверки будем использовать условие (14) и результаты расчетов по формуле (15). Допустимыми проверками для ИС $R_{1-5;4}^2 = R_{1,2}$ в соответствии с условием (4) являются: $\hat{\pi}_2$, $\hat{\pi}_3$ и $\hat{\pi}_5$. Например, проверка $\hat{\pi}_2$ согласно отображению (2) имеет следующие исходы:

$$\hat{\pi}_2 : R_{1,2} \rightarrow \begin{cases} R_{1,2;2}^1 = \{S_1\} = R_1, \text{ если } y_2 \in (0,2; 0,5) = \Delta_{1,2;2}^1; \\ R_{1,2;2}^2 = \{S_2\} = R_2, \text{ если } y_2 \in (0,7; 1,0) = \Delta_{1,2;2}^2. \end{cases}$$

Вычислим вероятности этих исходов, используя формулу (3):

$$|\nabla_{1,2;2}| = |(0,2; 0,5) \cup (0,7; 1,0)| = 0,6; P_{1,2}(\hat{\pi}_2^v) = \frac{|\Delta_{1,2;2}^v|}{|\nabla_{1,2;2}|} = 0,5 \quad (v = \{1; 2\}).$$

Проверка $\hat{\pi}_2$, выполняемая в ИС $R_{1,2}$, дает информацию, количество которой рассчитаем по формуле (15):

$$I_{1,2}(\hat{\pi}_2) = \sum_{v=1}^2 P_{1,2}(\hat{\pi}_2^v) [-\log_2 P_{1,2}(\hat{\pi}_2^v)] = 0,5 [-\log_2 0,5] + 0,5 [-\log_2 0,5] = 1.$$

Таким же образом вычислим информативность проверок $\hat{\pi}_3$ и $\hat{\pi}_5$:

$$I_{1,2}(\hat{\pi}_3) = 0,869; I_{1,2}(\hat{\pi}_5) = 0,958.$$

Поскольку проверка $\hat{\pi}_2$ обладает наибольшей информативностью, по условию (14) выберем ее для ИС $R_{1,2}$.

Определим наиболее «полезную» проверку для ИС $R_{1-5;4}^3 = \{S_1, S_2, S_3\} = R_{1,2,3}$. По условию (4) сформируем для ИС $R_{1,2,3}$ множество допустимых проверок $\hat{\Pi}_{1,2,3} = \{\hat{\pi}_1, \hat{\pi}_2, \hat{\pi}_3, \hat{\pi}_5\}$. Выполним, например, проверку $\hat{\pi}_2$ и получим ее исходы:

$$\hat{\pi}_2 : R_{1-3} \rightarrow \begin{cases} R_{1-3;2}^1 = \{S_3\} = R_3, \text{ если } y_2 \in (0,0; 0,2) = \Delta_{1-3;2}^1; \\ R_{1-3;2}^2 = \{S_1, S_3\} = R_{1,3}, \text{ если } y_2 \in (0,2; 0,4) = \Delta_{1-3;2}^2; \\ R_{1-3;2}^3 = \{S_1\} = R_1, \text{ если } y_2 \in (0,4; 0,5) = \Delta_{1-3;2}^3; \\ R_{1-3;2}^4 = \{S_2\} = R_2, \text{ если } y_2 \in (0,7; 1,0) = \Delta_{1-3;2}^4. \end{cases}$$

Для вычисления вероятностей $P_{1-3}(\hat{\pi}_2^v)$, $v = \overline{1, 4}$, воспользуемся формулой (3):

$$|\nabla_{1-3;2}| = \left| \bigcup_{i=1}^3 \ell_{i2} \right| = 0,8; P_{1-3}(\hat{\pi}_2^v) = \frac{|\Delta_{1-3;2}^v|}{|\nabla_{1-3;2}|} = \begin{cases} 0,25 (v = \{1; 2\}); \\ 0,125 (v = 3); \\ 0,375 (v = 4). \end{cases}$$

Сформируем векторы $P_{1-3;2(4)}$, $Q_{1-3;2(4)}$ и матрицу $P_{1-3;2[4]}$:

$$P_{1-3;2(4)} = [0,25 \quad 0,25 \quad 0,125 \quad 0,375]^T; Q_{1-3;2(4)} = [1,333 \quad 1,333 \quad 1,143 \quad 1,6]^T;$$

$$P_{1-3;2[4]} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0,125 & -0,125 \\ 0 & 0 & 0,125 & -0,125 \\ -0,125 & -0,125 & 0 & -0,25 \\ 0,125 & 0,125 & 0,25 & 0 \end{bmatrix}.$$

Вычислим по формуле (12) значение показателя $V_{1-3}(\hat{\pi}_2)$ полезности диагностической информации, получаемой при выполнении проверки $\hat{\pi}_2$ в ИС R_{1-3} :

$$V_{1-3}(\hat{\pi}_2) = P_{1-3;2(4)}^T P_{1-3;2[4]} Q_{1-3;2(4)} = 0,112.$$

Аналогичные вычисления для других проверок дают следующие результаты:

$$V_{1-3}(\hat{\pi}_1) = 0,089; V_{1-3}(\hat{\pi}_3) = 0,032; V_{1-3}(\hat{\pi}_5) = 0,025.$$

Согласно условию (13) наибольшую полезность в ИС ИС R_{1-3} имеет проверка $\hat{\pi}_2$. Единственный неконечный исход этой проверки – ИС $R_{1-3;2}^2 = \{S_1, S_3\} = R_{1,3}$ – состоит из двух элементов, поэтому для выбора наилучшей проверки следует использовать условие (14), которому удовлетворяет проверка $\hat{\pi}_1$, в наибольшей степени снимающая неопределенность ИС $R_{1,3}$.

Таким же образом определим, что для ИС $R_{1-5;4}^4 = \{S_2, S_3, S_5\} = R_{2,3,5}$ наибольшей полезностью обладает проверка $\hat{\pi}_2$ (при этом $V_{2,3,5}(\hat{\pi}_2) = 0,313$), а для ИС $R_{2,3,5;2}^3 = \{S_2, S_5\} = R_{2,5}$, являющегося ее неконечным исходом, по условию (14) следует выбрать проверку $\hat{\pi}_5$.

Шаг 7. Поскольку все конечные ИС $R_i = \{S_i\}$, $i = \overline{1, 5}$, достигнуты, завершим процедуру.

Шаг 8. Ориентированный граф, иллюстрирующий процедуру распознавания технических состояний, представлен на рис. 2. Упорядоченные подмножества $\hat{\Pi}_r$, ($r = \overline{1, 15}$), задающие

состав и очередность выполнения проверок $\hat{\pi}_j \in \hat{\Pi}$ для распознавания всех заданных ТС $S_i \in S (i = \overline{1, 5})$, сформируем в виде табл. 2.

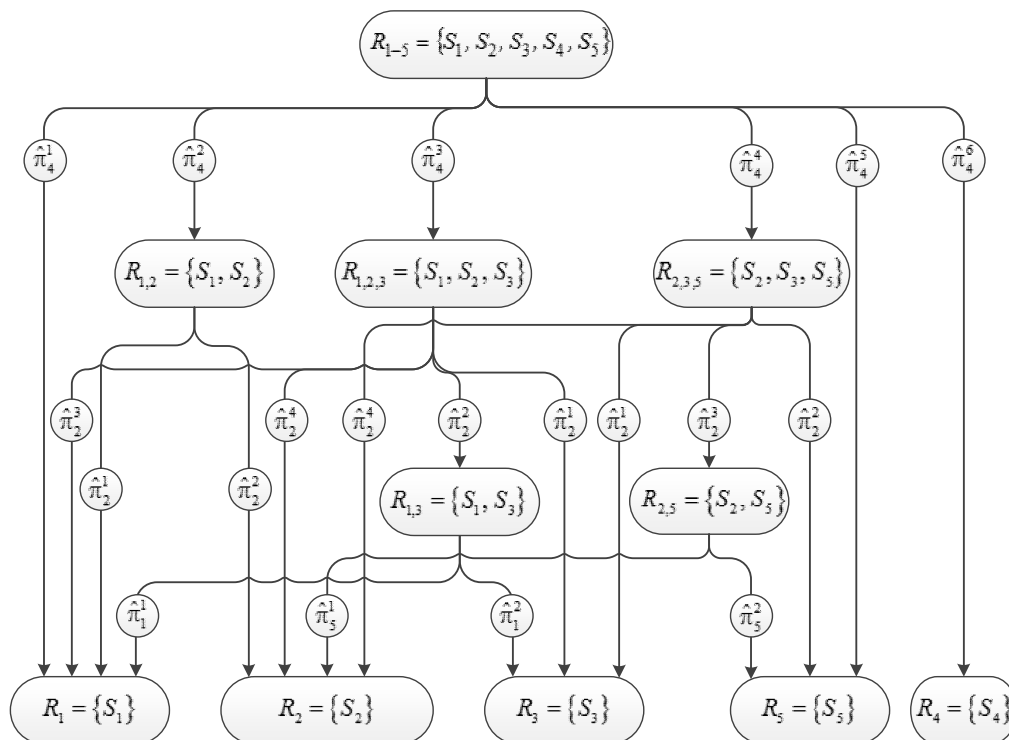


Рис. 2. Гибкая диагностическая процедура распознавания ТС БС

Таблица 2

Упорядоченные наборы проверок для распознавания заданных ТС

	ТС $S_i (i = \overline{1, 5})$				
	S_1	S_2	S_3	S_5	S_4
$\hat{\Pi}_1 = \{\hat{\pi}_4\}$		$\hat{\Pi}_5 = \{\hat{\pi}_4, \hat{\pi}_2\}$	$\hat{\Pi}_9 = \{\hat{\pi}_4, \hat{\pi}_2, \hat{\pi}_1\}$	$\hat{\Pi}_{15} = \{\hat{\pi}_4\}$	$\hat{\Pi}_{12} = \{\hat{\pi}_4, \hat{\pi}_2, \hat{\pi}_5\}$
$\hat{\Pi}_2 = \{\hat{\pi}_4, \hat{\pi}_2\}$		$\hat{\Pi}_6 = \{\hat{\pi}_4, \hat{\pi}_2\}$	$\hat{\Pi}_{10} = \{\hat{\pi}_4, \hat{\pi}_2\}$		$\hat{\Pi}_{13} = \{\hat{\pi}_4, \hat{\pi}_2\}$
$\hat{\Pi}_3 = \{\hat{\pi}_4, \hat{\pi}_2\}$		$\hat{\Pi}_7 = \{\hat{\pi}_4, \hat{\pi}_2, \hat{\pi}_5\}$	$\hat{\Pi}_{11} = \{\hat{\pi}_4, \hat{\pi}_2\}$		$\hat{\Pi}_{14} = \{\hat{\pi}_4\}$
$\hat{\Pi}_4 = \{\hat{\pi}_4, \hat{\pi}_2, \hat{\pi}_1\}$		$\hat{\Pi}_8 = \{\hat{\pi}_4, \hat{\pi}_2\}$			

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Следует отметить, что построенная ГДП оказалась идентичной программе, синтезированной для тех же исходных данных в работе [7]. Это позволяет сделать вывод о корректности предложенного математического аппарата применительно к оцениванию полезности диагностической информации, получаемой в процессе анализа телеметрируемых параметров, характеризующих техническое состояние БС КА.

Вместе с тем при построении диагностических процедур необходимо учитывать тот факт, что такие сложные объекты, как бортовые системы космических аппаратов, могут описываться с помощью различных моделей, качество которых также подлежит оцениванию [8]. При этом в зависимости от формы представления диагностических признаков и от решаемой

задачи (контроль правильности функционирования или диагностирование) необходимо использовать соответствующие модели объекта и процесса анализа технического состояния, а также различные подходы к выбору показателя, на основе которого будет формироваться диагностическая процедура.

Список используемых источников

1. Методы обеспечения живучести низкоорбитальных автоматических КА зондирования Земли: математические модели, компьютерные технологии / А.Н. Кирилин, Р.П. Ахметов, В.П. Макаров и др. – М.: Машиностроение, 2010. – 384 с.
2. Харкевич А.А. О ценности информации // Проблемы кибернетики. – М.: Физматгиз, 1960. – Вып. 4. – С. 53–72.
3. Дмитриев А.К., Копкин Е.В. Построение информационно-поисковой системы по критерию максимума полезности получаемой информации // Авиакосмическое приборостроение. – 2003. – № 6. – С. 46–51.
4. Теоретические основы и методы оптимизации анализа технического состояния сложных систем: монография / В.В. Мышко, А.Н. Кравцов, Е.В. Копкин и др. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2013. – 303 с.
5. Корогодина В.И., Корогодина В.Л. Информация как основа жизни. – Дубна: Издательский центр «Феникс», 2000. – 208 с.
6. Копкин Е.В., Кравцов А.Н., Лазутин О.Г. Выбор дискретных диагностических признаков с учетом их ценности для распознавания технических состояний объекта // Информация и космос. – 2015. – № 2. – С. 111–117.
7. Алгоритм построения гибкой программы диагностирования технического объекта по критерию ценности получаемой информации / Е.В. Копкин, В.А. Чикуров, В.В. Алейник и др. // Труды СПИИРАН. – 2015. – Вып. 4(41). – С. 106–130.
8. Микони С.В., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов: монография. – М.: РАН, 2018. – 314 с.

Е.В. Копкин,
доктор техн. наук, доцент;
Н.А. Попов

СИСТЕМНО-КОГНИТИВНАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ БОРТОВОЙ ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

В публикации предложена модель бортовой системы малого космического аппарата «Аист-2Д», отражающая причинно-следственные зависимости между результатами измерений телеметрируемых параметров и ее техническими состояниями, созданная на основе автоматизированного системно-когнитивного анализа.

Ключевые слова: автоматизированный системно-когнитивный анализ, интеллектуальная система «Эйдос», малый космический аппарат «Аист-2Д».

ВВЕДЕНИЕ

Сложные технические системы характеризуются тем, что в них происходят разнообразные и многочисленные физические процессы, оказывающие существенное влияние на характеристики этих систем. Примером такой системы является малый космический аппарат (МКА) «Аист-2Д», изображенный на рис. 1.

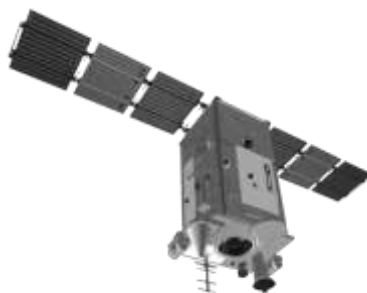


Рис. 1. Малый космический аппарат «Аист-2Д»

МКА «Аист-2Д» предназначен для решения следующих основных задач [1]:

- отработки конструкции и бортовой аппаратуры (БА) малой космической платформы для МКА дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ);
- отработки программно-технических средств малой космической платформы;
- отработки целевой аппаратуры, наземных средств управления, приема, обработки информации и методов обработки информации ДЗЗ с высоким разрешением и увеличенной полосой захвата;
- отработки методов съемки в ИК-диапазоне с использованием микроболометрической матрицы.

Создание адекватной модели сложной технической системы, на основе которой можно вырабатывать научно-обоснованные рекомендации по ее применению, в настоящее время имеет ряд существенных трудностей.

При создании моделей сложных технических систем классическим способом необходимо описывать моделируемые системы в динамике с использованием систем уравнений, то есть строить содержательные модели (СМ) аналитического типа.

Применение классического подхода при создании моделей бортовых систем МКА не всегда оправдано. Связано это прежде всего с тем, что при использовании классического подхода возникают трудности, заключающиеся в сложном описании процессов функционирования бортовой аппаратуры МКА, требуются существенные затраты времени, профессиональная компетенция, опыт, интуиция и интеллектуальное напряжение экспертов. В связи с этим при разработке СМ аналитического типа вводится множество допущений и ограничений.

В [2] представлены различные подходы к моделированию. Применительно к рассматриваемой предметной области предпочтительным является использование подхода, основанного на создании функциональных моделей (Ф-модели). С точки зрения системного анализа Ф-модель представляет систему в целом в виде «черного ящика», содержимое которого не раскрывается.

Ф-модели могут строиться непосредственно на основе эмпирических (экспериментальных, статистических) данных. Создание таких моделей значительно проще и быстрее, чем разработка СМ аналитического типа.

С другой стороны, Ф-модели могут быть вполне достаточны для определения причинно-следственных зависимостей между результатами измерений телеметрируемых параметров (ТМП) и техническими состояниями (ТС) бортовых систем космических аппаратов (КА). Кроме того, Ф-модели могут рассматриваться в качестве первого этапа разработки СМ аналитического типа.

Таким образом, задача разработки Ф-моделей бортовых систем КА является актуальной и практически значимой.

Целью проводимых исследований является разработка Ф-модели бортовой системы МКА «Аист-2Д» и путем организации имеющегося знания о бортовой системе МКА «Аист-2Д» (на основе Ф-модели) создание системно-когнитивной модели, представляющей отображение ранее неизвестных свойств бортовой системы МКА «Аист-2Д».

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ СИСТЕМНО-КОГНИТИВНЫЙ АНАЛИЗ КАК СРЕДСТВО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для создания Ф-модели и системно-когнитивной модели сложной технической системы предлагается применить методологию автоматизированного системно-когнитивного анализа (АСК-анализ). АСК-анализ разработан в 2002 г. для решения задач диагностики (распознавания, идентификации, классификации), поддержки принятия решений и исследования моделируемой предметной области путем исследования ее модели. АСК-анализ имеет программный инструментарий – универсальную когнитивную аналитическую систему «Эйдос» (система «Эйдос») [4].

Система «Эйдос» непосредственно на основе эмпирических (экспериментальных, статистических) данных позволяет рассчитать количество информации о фактах (признаках), влияющих на функционирование БА МКА в различных режимах работы. Создаваемая на их основе в системе «Эйдос» системно-когнитивная информационная (интеллектуальная) модель позволяет в наглядной форме отразить влияние факторов на ТС бортовой системы МКА и провести анализ с целью выявления наиболее информативных признаков, характеризующих переход бортовой системы МКА в различные виды ТС. Под ТС в статье понимается состояние бортовой системы МКА «Аист-2Д», характеризующее совокупностью установленных в документации параметров, описывающих ее способность выполнять требуемые функции в рассматриваемых условиях [5]. Единственной сложностью, которая возникает в процессе создания системно-когнитивной модели, является адаптация эмпирических (экспериментальных) данных к виду, удобному для дальнейшего импорта в систему «Эйдос». То есть необходимо на основе имеющихся эмпирических данных создать (с использованием методологии АСК-анализа) обучающую выборку, которая представляет Ф-модель.

В данной работе в качестве эмпирических данных выступают перечень и значения ТМП системы расфиксации батарей солнечных (БС) МКА «Аист-2Д» (табл. 1).

Таблица 1

Перечень и значения ТМП МКА «Аист-2Д» (фрагмент)

Индекс ТМП	Условное обозначение параметра	Значение	Примечание
у1.	Датчик фиксации створок БС КН02	1	Створки БС не зафиксированы
у2.		0	Створки БС зафиксированы
у3.	Датчик срабатывания тепловой чеки БС КН04	0	Тепловая чека БС в исходном состоянии
у4.		1	Срабатывание тепловой чеки БС
у5.	Датчик фиксации корневой створки БС в раскрытом положении КН06	0	Корневая створка БС в раскрытом положении в исходном состоянии
у6.		1	Корневая створка БС в раскрытом положении зафиксирована
у7.	Датчик фиксации корневой створки БС в раскрытом положении КН08	0	Корневая створка БС в раскрытом положении в исходном состоянии...
у8.		1	Корневая створка БС в раскрытом положении зафиксирована
у9.	Датчик фиксации промежуточной створки БС в раскрытом положении КН10	0	Промежуточная створка БС в раскрытом положении в исходном состоянии
у10.		1	Промежуточная створка БС в раскрытом положении зафиксирована
у11.	Датчик фиксации промежуточной створки БС в раскрытом положении КН12	1	Промежуточная створка БС в раскрытом положении в исходном состоянии
у12.		0	Промежуточная створка БС в раскрытом положении зафиксирована
у13.	Датчик фиксации концевой створки БС в раскрытом положении КН14	0	Концевая створка БС в раскрытом положении в исходном состоянии
у14.		1	Концевая створка БС в раскрытом положении зафиксирована
у15.	Датчик фиксации концевой створки БС в раскрытом положении КН16	0	Концевая створка БС в раскрытом положении в исходном состоянии
у16.		1	Концевая створка БС в раскрытом положении зафиксирована
у17.	Ток батареи фотоэлектрической (ТБФ)	от 0 до 50 А	Ток БФ

Методология АСК-анализа предполагает постепенное повышение степени формализации информации (рис. 2) путем выполнения последовательных этапов [4]:

- 1) когнитивная структуризация и формализация предметной области (предполагает определение классификационных и описательных шкал);
- 2) синтез и верификация моделей, определение наиболее достоверной модели;
- 3) решение задач идентификации, прогнозирования, принятия решений и исследования предметной области путем исследования ее модели.

Математический аппарат преобразования информации (рис. 2) автоматизирован и реализован в системе «Эйдос». Подробное описание математического аппарата представлено в [4]. Применение данного математического аппарата позволяет выявить наиболее информативные признаки, влияющие на функционирование бортовой системы МКА «Аист-2Д» в различных режимах работы.



Рис. 2. Тезаурус автоматизированного системно-когнитивного анализа

СИСТЕМНО-КОГНИТИВНАЯ МОДЕЛЬ БОРТОВОЙ СИСТЕМЫ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА «АИСТ-2Д»

Рассмотрим пример построения системно-когнитивной модели системы расфиксации БС МКА «Аист-2Д».

БС состоит из батарей фотоэлектрических (БФ) и механического устройства БС (МУ БС).

МУ БС содержит две панели. Каждая панель, в свою очередь, состоит из трех створок (см. рис. 1). МУ БС предназначено для крепления БФ; закрепления БС на МКА в сложенном состоянии; раскрытия панелей БС по команде управления из бортового комплекса управления; выдачи телеметрической информации о раскрытии панелей.

Процесс раскрытия панелей БС МКА «Аист-2Д» разделяется на ряд последовательных шагов [1]:

- срабатывание тепловой чеки узла расчеховки;
- отвод всего пакета створок от корпуса МКА;
- фиксация корневой створки БС;
- фиксация промежуточной створки БС;
- фиксация концевой створки БС;
- контроль наличия тока БФ.

Первый этап АСК-анализа предполагает определение набора факторов и результатов их совместного действия.

В данном примере в качестве факторов были выбраны диагностические признаки, значения которых характеризуют процесс раскрытия панелей БС МКА «Аист-2Д». В качестве результата совместного действия этих факторов рассматриваются возможные технические состояния системы расфиксации БС МКА «Аист-2Д».

Формализация предметной области предполагает создание на основе табл. 1 классификационных шкал (табл. 2), описательных шкал и их градаций (табл. 3), кодирование исходных данных с их применением (табл. 4, рис. 3), то есть разработку обучающей выборки.

Таблица 2

Справочник классификационных шкал и градаций

Код класса	Наименование класса (технического состояния)
1	Концевая створка БС не зафиксирована
2	Корневая створка БС не зафиксирована
3	Не сработала термочeka узла расчeковки (не осуществлен отвод всего пакета створок от корпуса МКА)
4	Пакеты створок БС зафиксированы к корпусу МКА (раскрывания БС не произошло)
5	Промежуточная створка БС не зафиксирована
6	Створки БС раскрыты и зафиксированы

Таблица 3

Справочник описательных шкал и градаций

Код признака	Условное обозначение ТМП	Наименование признака
1	КН04 - 0	Тепловая чека БС в исходном состоянии
2	КН04 - 1	Срабатывание тепловой чеки БС
3	КН02 - 0	Створки БС зафиксированы
4	КН02 - 1	Створки БС не зафиксированы
5	КН06 - 0	Корневая створка БС в раскрытом положении в исходном состоянии
6	КН06 - 1	Корневая створка БС в раскрытом положении зафиксирована
7	КН10 - 0	Промежуточная створка БС в раскрытом положении в исходном состоянии
8	КН10 - 1	Промежуточная створка БС в раскрытом положении зафиксирована
9	КН12 - 0	Промежуточная створка БС в раскрытом положении зафиксирована
10	КН12 - 1	Промежуточная створка БС в раскрытом положении в исходном состоянии
11	КН 14 - 0	Концевая створка БС в раскрытом положении в исходном состоянии, нет тока
12	КН 14 - 1	Концевая створка БС в раскрытом положении зафиксирована, есть ток (1–50 А)
13	ТБФ - 0	Ток 0 А
14	ТБФ - 1	Ток 1–50 А

Таблица 4

Закодированные исходные данные (обучающая выборка)

Описание технического состояния	Код состояния	КН04	КН02	КН06	КН10	КН12	КН14	ТБФ
Концевая створка БС не зафиксирована	1	2	4	6	8	9	11	13
Корневая створка БС не зафиксирована	2	2	4	5	7	10	11	13
Не сработала термочeka узла расчeковки	3	1	3	5	7	10	11	13
Пакеты створок БС зафиксированы к корпусу МКА	4	2	4	5	7	10	11	13
Промежуточная створка БС не зафиксирована	5	2	4	6	7	10	11	13
Створки БС раскрыты и зафиксированы	6	2	4	6	8	9	12	14

2.4. Просмотр эвентологических баз данных (баз событий). Текущая модель: "INF1"

№	Наименование объекта	2. ТЕХНИЧЕСКИЕ СОСТОЯНИЯ	3. ДАТЧИК СРАБ ТЕПЛ ЧЕКИ	4. Д. ФИКС СТВОРОК БС	5. Д. ФИКС КОРН СТВОРКИ	6. Д.1 ФИКС ПРОМЕЖ СТВ	7. Д.2 ФИКС ПРОМЕЖ СТВ	8. Д. ФИКС КОНЦ СТВ	9. ТБФ
1	Створки БС раскрыты и зафиксированы ...	6	2	4	6	8	9	12	14
2	Не сработала термочка узла расчеховки ...	3	1	3	5	7	10	11	13
3	Концевая створка БС не зафиксирована ...	1	2	4	6	8	9	11	13
4	Промежуточная створка БС не зафиксирована ...	5	2	4	6	7	10	11	13
5	Корневая створка БС не зафиксирована ...	2	2	4	5	7	10	11	13
6	Пакеты створок БС зафиксированы к корпусу М...	4	2	3	5	7	10	11	13
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Рис. 3. Закодированные исходные данные (обучающая выборка), сгенерированные в систему «Эйдос»

Обучающая выборка (рис. 3) содержит совокупность взаимосвязанных данных и представляет собой базу исходных данных (см. табл. 2 и 3), т.е. Φ -модель, закодированную с помощью классификационных (3-й столбец) и описательных шкал (4-й – 9-й столбцы на рис. 3). В теоретико-множественном виде созданная Φ -модель имеет следующий вид:

$$M_o = \langle \mathcal{S}, \Pi, \hat{\Pi}, \mathfrak{S}, \Phi \rangle.$$

Здесь \mathcal{S} – множество технических состояний, в одном из которых находится бортовая система, $\mathcal{S} = \{S_i \mid i = \overline{1, m}\}$;

Π – множество диагностических признаков (ДП), на котором все ТС попарно различимы, $\Pi = \{\pi_j \mid j = \overline{1, n}\}$;

$\hat{\Pi}$ – множество проверок, заданных (или выбранных) ДП, $\pi_j \in \Pi$, $\hat{\Pi} = \{\hat{\pi}_j \mid j = \overline{1, n}\}$;

\mathfrak{S} – множество закодированных модельных значений признаков, каждый из которых означает наиболее вероятный исход проверки $\hat{\pi}_j \in \hat{\Pi}$ в ТС $S_i \in \mathcal{S}$, $\mathfrak{S} = \{s_{ij} \mid i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}\}$;

Φ – отображение, при котором $s_{ij} = \Phi(S_i, \hat{\pi}_j)$, $S_i \in \mathcal{S}$, $\hat{\pi}_j \in \hat{\Pi}$, $\Phi: \mathcal{S} \times \hat{\Pi} \rightarrow \mathfrak{S}$.

Второй этап АСК-анализа предполагает проведение синтеза и верификации статистических моделей и системно-когнитивных моделей, а также выбор наиболее достоверной модели [4].

Статистические и системно-когнитивные модели представляют собой результат многопараметрической типизации ТС, описанных в исходных данных (см. табл. 4). Системно-когнитивные модели содержат в себе информацию, отражающую количественное влияние различных значений признаков на функционирование системы расфиксации БС МКА «Аист-2Д», т.е. знания. Таким образом, созданные системно-когнитивные модели являются интеллектуальными моделями, или моделями знаний.

В результате выполнения синтеза и верификации создаются три статистических и семь системно-когнитивных моделей, отражающих влияние значений ТМП на функционирование системы расфиксации БС МКА «Аист-2Д».

На рис. 4 отображен фрагмент системно-когнитивной (интеллектуальной) модели, рассчитанной на основе частного критерия ROI (Return On Investment) [4].

Системно-когнитивная модель отражает в количественном виде (в битах), какие значения диагностических признаков способствуют изменениям технических состояний системы расфиксации БС МКА «Аист-2Д». В данной системно-когнитивной модели отражается «сила»

(может быть как положительной, так и отрицательной) и направление влияния (влияет положительно или отрицательно) всех значений диагностических признаков на переход системы расфиксации БС МКА «Аист-2Д» в различные ТС [6].

№	Наименование устройства	1	2	3	4	5	6	Сумма	Среднее	Среднеквадратичное отклонение
Класс	исходный параметр	ТЕХНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ КОНЦЕВЫХ СТВОРКА БС НЕ ЗАФИКСИРОВА	ТЕХНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ КОНЦЕВЫХ СТВОРКА БС НЕ ЗАФИКСИРОВА	ТЕХНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ СРАБОТКА ТЕРМИЧЕСКАЯ МОДА ПРОЦЕССОР	ТЕХНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ЛАМЕТЫ СТВОРКА БС ЗАФИКСИРОВА И КОРПУС МКА	ТЕХНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОМЕЖУТОЧ. СТВОРКА БС НЕ ЗАФИКСИРОВА	ТЕХНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ СТВОРКИ БС РАДР/ПН И ЗАФИКСИРОВА			
1	ДАТЧИК СРАБ ТЕПЛО ЧЕКИ 1/2 (0.000000) 0.5			0.500				0.500	0.500	0.000
2	ДАТЧИК СРАБ ТЕПЛО ЧЕКИ 2/2 (0.500000) 1.0	0.200	0.200		0.200	0.200	0.200	1.000	0.167	0.082
3	Д ФИКС СТВОРКА БС 1/2 (0.000000) 0.500000			2.000				2.000	0.667	0.833
4	Д ФИКС СТВОРКА БС 2/2 (0.500000) 1.000000	0.500	0.500				0.500	2.000	0.333	0.289
5	Д ФИКС КОРН СТВОРКИ 1/2 (0.000000) 0.500000		1.000	1.000	1.000			3.000	0.500	0.548
6	Д ФИКС КОРН СТВОРКИ 2/2 (0.500000) 1.000000	1.000					1.000	2.000	0.500	0.548
7	Д 1 ФИКС ПРОМЕЖ СТВ 1/2 (0.000000) 0.500000		0.500	0.500	0.500			2.000	0.333	0.289
8	Д 1 ФИКС ПРОМЕЖ СТВ 2/2 (0.500000) 1.000000	2.000					2.000	4.000	0.667	1.033
9	Д 2 ФИКС ПРОМЕЖ СТВ 1/2 (0.000000) 0.500000	2.000					2.000	4.000	0.667	1.033
10	Д 2 ФИКС ПРОМЕЖ СТВ 2/2 (0.500000) 1.000000		0.500	0.500	0.500	0.500		2.000	0.333	0.289
11	Д ФИКС КОРН СТВ 1/2 (0.000000) 0.500000	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200		1.000	0.167	0.082
12	Д ФИКС КОРН СТВ 2/2 (0.500000) 1.000000	0.200					0.200	0.800	0.200	0.167
13	ТБФ 1/2 (0.000000) 0.500000	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200		1.000	0.167	0.082
14	ТБФ 2/2 (0.500000) 1.000000	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	1.000	0.167	0.082
	Сумма	4.100	3.100	9.400	4.600	3.300	15.700	42.000		
	Среднее	0.838	0.221	0.671	0.329	0.221	1.321		0.500	
	Среднеквадратичное отклонение	0.219	0.102	1.364	0.542	0.362	1.791			1.077

Рис. 4. Системно-когнитивная модель системы расфиксации БС МКА «Аист-2Д»

Оценка достоверности моделей в системе «Эйдос» осуществляется путем подсчета суммарного количества верно и ошибочно классифицированных и не классифицированных ТС по F-мере Ван Ризбергера и L-мерам Е.В. Луценко, представляющим среднее гармоническое метрик «точности» и «полноты» [7].

На рис. 5 показаны значения достоверности каждой частной модели в соответствии с мерами достоверности. В данном случае по L-мере (учитывает возможность принадлежности ТС ко многим классам ТС) наивысшую достоверность имеет модель, рассчитанная на основе частного критерия ROI (Return On Investment) с интегральным критерием «сумма знаний» (рис. 4) [4].

Наименование модели	Интегральный критерий	мера L-меры	Средний индекс достоверности по критерию L-меры	Средний индекс достоверности по критерию F-меры	Средний индекс достоверности по критерию F-меры	Средний индекс достоверности по критерию F-меры	Средний индекс достоверности по критерию F-меры	Достоверность по критерию F-меры	Достоверность по критерию L-меры	Достоверность по критерию L-меры
1. АИ1 - частный критерий количества взрывчатых веществ	Корректировка абсолют с обр.	0.822	1.000	0.824	0.375	0.656	1.000	0.783		
1. АИ2 - частный критерий количества взрывчатых веществ	Среднее абсолют по критерию	0.434	1.000	0.560	0.641	1.000	0.781			
2. ФРС1 - частный критерий усл. вероятность. Итог прихода сред.	Корректировка усложняет критерий с об.	0.434	1.000	0.524	0.375	0.656	1.000	0.775		
2. ФРС2 - частный критерий усл. вероятность. Итог прихода сред.	Среднее усложняет критерий по критерию	0.434	1.000	0.560	0.641	1.000	0.781			
3. ФРС2 - частный критерий усл. вероятность. Итог прихода сред.	Корректировка усложняет критерий по критерию	0.434	1.000	0.524	0.375	0.656	1.000	0.775		
3. ФРС2 - частный критерий усл. вероятность. Итог прихода сред.	Среднее усложняет критерий по критерию	0.434	1.000	0.560	0.641	1.000	0.781			
4. ИР1 - частный критерий количество знаний по А.Харченко в.	Семантический резонанс зна.	0.704	0.919	0.395	0.554	0.704	1.000	0.927		
4. ИР1 - частный критерий количество знаний по А.Харченко в.	Среднее знаеий	0.573	0.645	0.249	0.727	1.000	0.944			
5. ИР2 - частный критерий количество знаний по А.Харченко в.	Семантический резонанс зна.	0.704	0.919	0.395	0.554	0.704	1.000	0.927		
5. ИР2 - частный критерий количество знаний по А.Харченко в.	Среднее знаеий	0.552	0.665	0.249	0.727	1.000	0.942			
6. ИР3 - частный критерий Знавадарт, разности между фактил.	Семантический резонанс зна.	0.408	0.927	0.444	0.532	0.689	1.000	0.911		
6. ИР3 - частный критерий Знавадарт, разности между фактил.	Среднее знаеий	0.705	0.754	0.316	0.462	0.705	1.000	0.924		
7. ИР4 - частный критерий ROI (Return On Investment) по критерию	Семантический резонанс зна.	0.724	0.950	0.293	0.715	0.686	1.000	0.914		
7. ИР4 - частный критерий ROI (Return On Investment) по критерию	Среднее знаеий	0.395	0.141	0.167	0.771	1.000	0.976			
8. ИР5 - частный критерий ROI (Return On Investment) по критерию	Семантический резонанс зна.	0.724	0.950	0.293	0.715	0.686	1.000	0.914		
8. ИР5 - частный критерий ROI (Return On Investment) по критерию	Среднее знаеий	0.355	0.541	0.167	0.771	1.000	0.976			
9. ИР6 - частный критерий разн.усли.безусл.вероятностей.авр.	Семантический резонанс зна.	0.587	0.980	0.437	0.528	0.687	1.000	0.925		
9. ИР6 - частный критерий разн.усли.безусл.вероятностей.авр.	Среднее знаеий	0.306	0.754	0.323	0.700	1.000	0.974			
10. ИР7 - частный критерий разн.усли.безусл.вероятностей.авр.	Семантический резонанс зна.	0.587	0.980	0.437	0.528	0.687	1.000	0.925		
10. ИР7 - частный критерий разн.усли.безусл.вероятностей.авр.	Среднее знаеий	0.306	0.754	0.323	0.700	1.000	0.974			

Рис. 5. Обобщенное отображение достоверности статистических и системно-когнитивных моделей по различным критериям (фрагмент)

Третий этап АСК-анализа предполагает решение задачи идентификации и прогнозирования, а также изучение объекта моделирования путем исследования его модели.

На основе системно-когнитивной модели системы расфиксации БС МКА «Аист-2Д» в системе «Эйдос» предусмотрена возможность графического отображения в форме семантических сетей сходства/различия классов (ТС) [4].

Семантические сети (рис. 6) отображают сходство и различие классов (ТС) на основе значений их диагностических признаков.

Светлой линией отображается сходство, темной – различие. Степень сходства и различия измеряется в процентах, отображенных на линиях. Чем толще линия, тем сходство больше.

Классы образуют два кластера, являющиеся полюсами конструкта. В кластеры объединены сходные классы, а на полюсах конструкта находятся противоположные по смыслу кластеры.

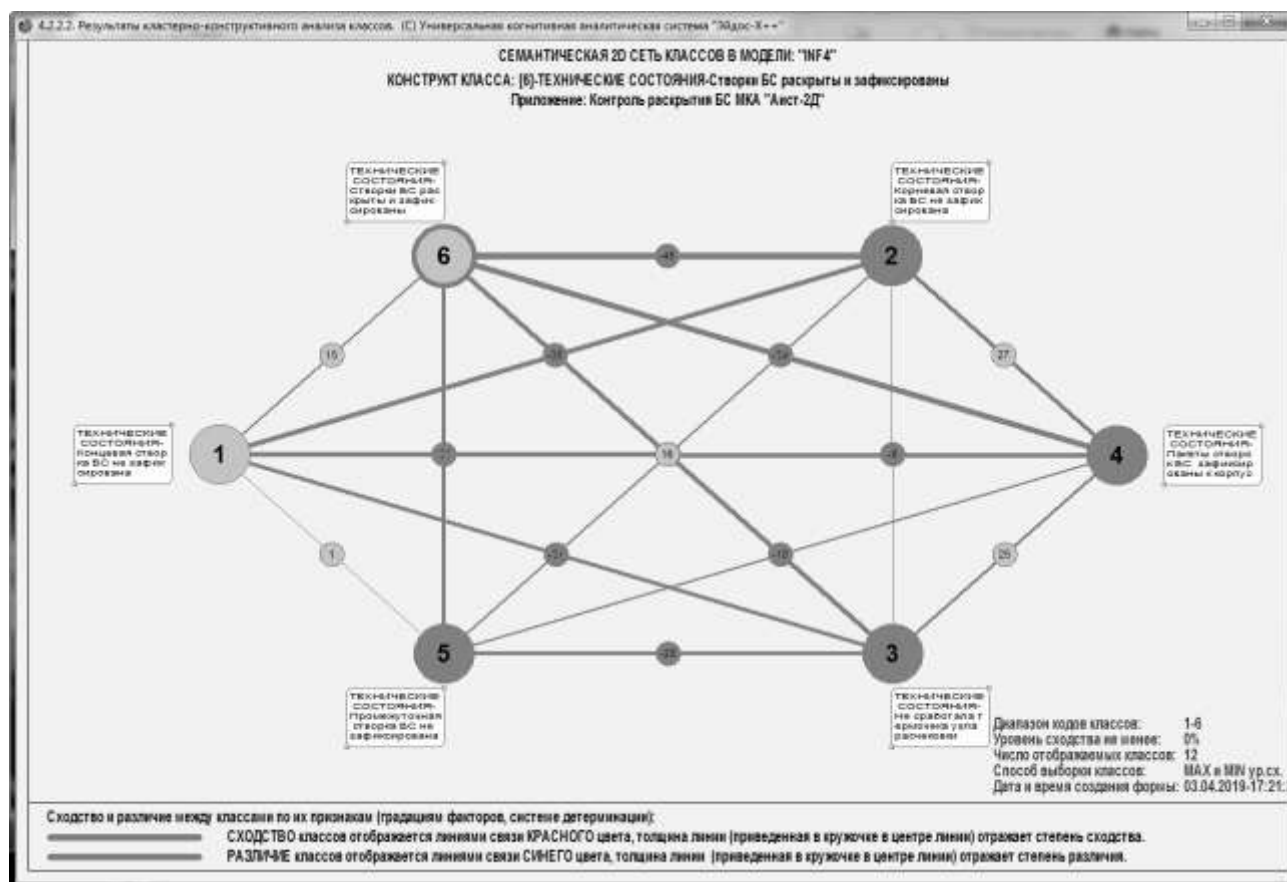


Рис. 6. Семантическая сеть, отражающая сходство и различие технических состояний системы расфиксации БС МКА «Аист-2Д»

На рис. 6 видно, что с ТС 6 (створки БС раскрыты и зафиксированы) наибольшее сходство имеет (15% сходства) ТС 1 (концевая створка БС не зафиксирована), наименьшее сходство имеет (различие 45%) ТС 2 (корневая створка БС не зафиксирована), с ТС 3 (отказ термочехла узла расчеховки) наибольшее сходство имеет (25% сходства) ТС 4 (пакеты створок БС зафиксированы к корпусу), наименьшее сходство имеет (различие 33%) ТС 6 (створки БС раскрыты и зафиксированы).

Таким образом, если сработает термочехла узла расчеховки и пакеты створок отделятся от корпуса МКА, но не зафиксируется корневая створка БС, то и раскрытия с фиксацией остальных створок БС не произойдет. Это говорит о том, что системно-когнитивная модель верно отражает моделируемую систему и на ее основе возможно проводить исследования.

КОГНИТИВНЫЕ ФУНКЦИИ

В системе «Эйдос» существует возможность наглядного графического отображения влияния различных значений диагностических признаков (факторов) на функционирование контролируемого объекта при помощи когнитивных функций [6].

Полученные и отраженные в форме когнитивных функций причинно-следственные зависимости определяются непосредственно на основе эмпирических данных путем преобразования их в информацию, а ее – в знания, и отражают факты, а не их теоретическое объяснение.

На рис. 7 приведена когнитивная функция, отражающая «силу» и направление влияния различных значений диагностических признаков (ось абсцисс) на переход системы расфиксации БС МКА «Аист-2Д» в различные ТС (ось ординат). В созданной и исследуемой системно-когнитивной модели отражено влияние семи диагностических признаков (факторов) на переход системы расфиксации БС МКА «Аист-2Д» в одно из описанных ТС.

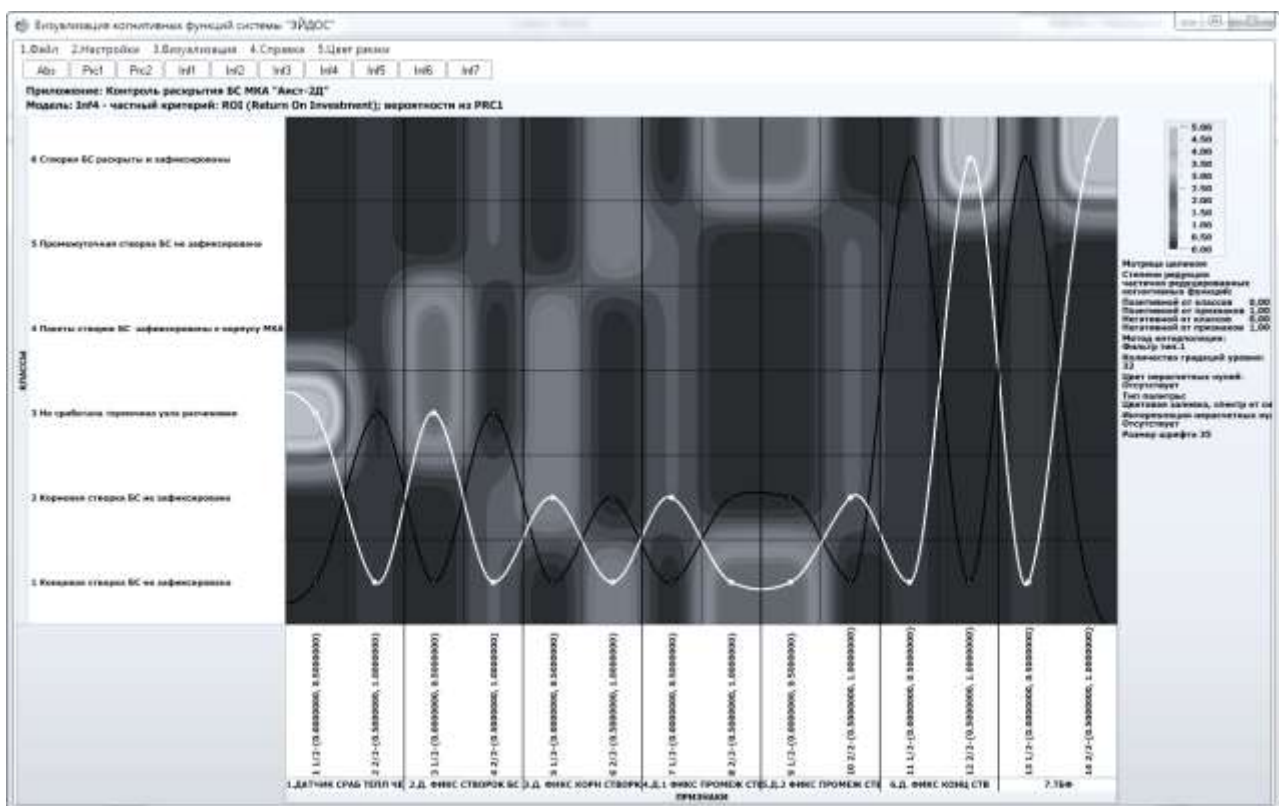


Рис. 7. Когнитивная функция, отражающая силу и направление влияния различных значений признаков на переход системы расфиксации БС МКА «Аист-2Д» в различные ТС

Яркость фона на рис. 7 отражает количество информации в аргументе о значении функции: высокая яркость – максимальное количество информации (т.е. что будет), а отсутствие яркости – минимальное количество информации (чего не будет). Белая линия соединяет точки со значениями функции, в которых в каждом значении аргумента содержится максимальное количество информации, черная – минимальное количество информации.

Применение когнитивных функций и семантических сетей, созданных на основе системно-когнитивной модели системы расфиксации БС МКА «Аист-2Д», позволяет провести их анализ, сформировать в виде ориентированного графа наиболее информативную гибкую программу анализа (ГПА) ТС и спрогнозировать развитие нештатной ситуации в случае отказа (сбоя).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа рассчитанных когнитивных функций возможно выделить наиболее информативные ТМП при контроле правильности функционирования системы расфиксации БС МКА «Аист-2Д» и сформировать в виде ориентированного графа ГПА, при реализации используются проверки, в большей степени снимающие исходную неопределенность ТС системы.

Наибольшей информативностью (5 бит) обладают следующие ТМП: КН04, КН16, ТБФ.

Данные параметры характеризуют срабатывание тепловой чеки, фиксацию концевой створки БС и наличие тока.

ГПА ТС, построенная на основе полученной когнитивной функции, представлена на рис. 8 [8].

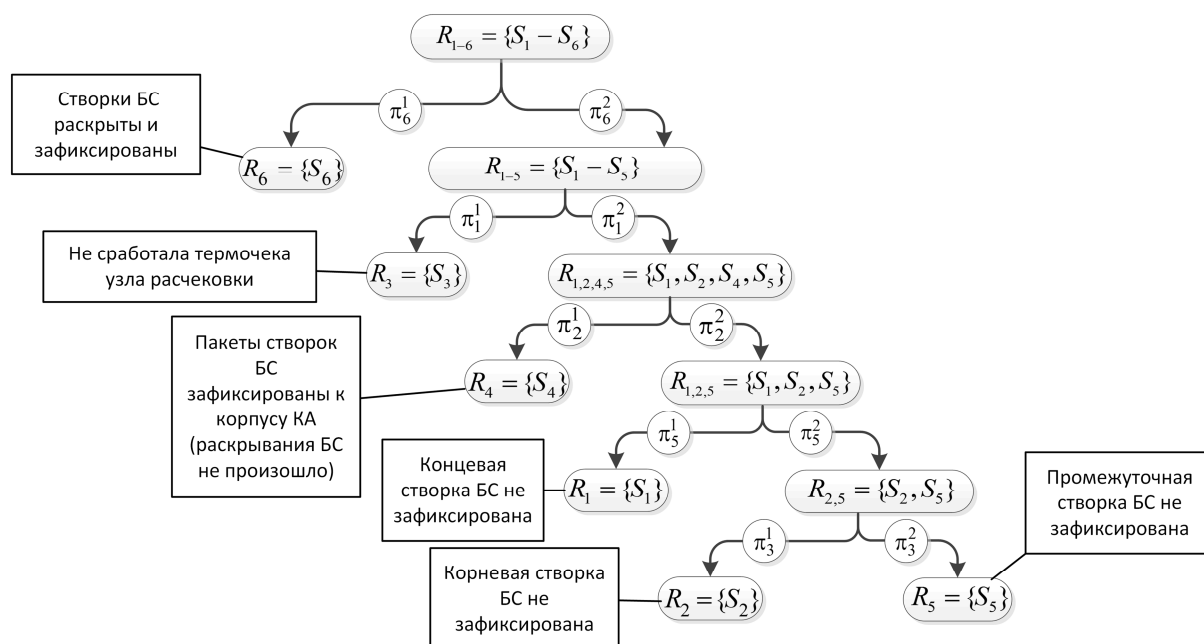


Рис. 8. ГПА ТС системы расфиксации БС МКА «Аист-2Д»

В связи с тем, что признаки 11–14 (см. табл. 3) имеют одинаковую информативность (5 бит) и их проверка способствует распознаванию ТС 6 (см. табл. 2), в ГПА включены только проверки признаков 11 и 12 (см. табл. 3). На ГПА проверка данных признаков обозначена: π_6^1 , π_6^2 .

Таким образом, представленная системно-когнитивная модель системы расфиксации БС МКА «Аист-2Д» позволяет отразить в виде когнитивных функций и семантических сетей причинно-следственные зависимости между результатами измерений ТМП и техническими состояниями системы.

Список используемых источников

1. Опытнo-технологический малый космический аппарат «АИСТ-2Д» / А.Н. Кирилин Р.Н. Ахметов, Е.В. Шахматов и др. – Самара: СамНЦ РАН, 2017. – 324 с.
2. Микони С.В., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов: монография – М.: РАН, 2018. – 314 с.
3. Луценко Е.В., Серга Г.В. Теория информации и когнитивные технологии в моделировании сложных многопараметрических динамических технических систем // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного универ-

ситета: научный журнал КубГАУ. – 2016. – № 121(07). – С. 1–48. – URL: <http://ej.kubagro.ru/2016/07/02.pdf> (дата обращения: 10.03.2019).

4. *Луценко Е.В.* Универсальная когнитивная аналитическая система «Эйдос»: монография. – Краснодар: КубГАУ, 2014. – 600 с.

5. ГОСТ 27.002–2015. Надежность в технике. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2016. – 22 с.

6. *Луценко Е.В., Орлов А.И.* Системная нечеткая интервальная математика: монография. – Краснодар: КубГАУ, 2014. – 600 с.

7. *Луценко Е.В.* Инвариантное относительно объемов данных нечеткое мультиклассовое обобщение F-меры достоверности моделей Ван Ризбергена в АСК-анализе и системе «Эйдос» // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета: научный журнал КубГАУ. – 2017. – № 02(126). – С. 1–32. – URL: <http://ej.kubagro.ru/2017/02/pdf/01.pdf> (дата обращения: 10.03.2019).

8. *Копкин Е.В., Попов Н.А.* Сокращение размерности пространства диагностических признаков при контроле технического состояния объектов на основе использования автоматизированного системно-когнитивного анализа // Научная сессия ГУАП: сборник докладов: в 3 ч. – СПб.: ГУАП, 2018. – Ч. II: Технические науки. – С. 335–338.

В.В. Карагодин,
доктор техн. наук, профессор;
Д.В. Рыбаков,
кандидат техн. наук;
Н.В. Рыжий

ПРИМЕНЕНИЕ ЧАСТОТНОГО МЕТОДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ СПЕЦИАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

Широкое применение приемников электрической энергии с нелинейными вольт-амперными характеристиками порождает технические трудности использования (возможно возникновение резонансных явлений) в электрических сетях специальных комплексов для компенсации реактивной мощности батарей статических конденсаторов, рассчитанных на синусоидальные токи и напряжения. Исследование процесса работы конденсаторных установок возможно с помощью применения частотного метода, основанного на применении передаточных функций и частотных характеристик. В публикации рассматриваются вопросы применения частотных характеристик для исследования систем электроснабжения с использованием математического пакета MatLab.

Ключевые слова: распределительные электрические сети, компенсация реактивной мощности, нелинейные нагрузки, частотные характеристики, передаточные функции.

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее действенным и эффективным способом уменьшения потерь мощности в распределительных электрических сетях является применение конденсаторных установок, которые по сравнению с другими средствами компенсации реактивной мощности в большинстве случаев оказываются более экономичным средством [1, 2].

Широкое применение в последние годы в различных технических и технологических системах преобразовательной техники на базе силовых полупроводниковых элементов приводит к увеличению числа и единичной мощности нелинейных электрических нагрузок, имеющих нелинейные вольт-амперные характеристики. Нелинейные нагрузки оказывают негативное влияние на качество электрической энергии в питающих электрических сетях из-за искажения синусоидальной формы кривых питающих напряжений (появление в сетях высших гармоник). К таким нагрузкам относятся автоматизированные системы управления на базе ЭВМ, микроконтроллеров и промышленных контроллеров; статические источники бесперебойного питания; преобразователи частоты для асинхронных двигателей и двигателей постоянного тока, обеспечивающие непрерывные технологические процессы подготовки и запуска ракет космического назначения, контроля воздушного и космического пространства, ведения разведки космической обстановки.

Конденсаторные батареи, применяемые в системах компенсации реактивной мощности, как правило, рассчитаны на синусоидальные токи и напряжения. В связи с этим их применение в сетях с нелинейными нагрузками может быть сопряжено с техническими трудностями, а в некоторых случаях их применение может оказаться вообще недопустимым. Возможные технические трудности обусловлены, главным образом, возникающими на частотах высших гармоник токовыми перегрузками, которые могут привести к выходу из строя конденсаторов.

Известно [3], что для конденсаторных установок максимальная допустимая перегрузка по току составляет 30 %, по напряжению – 10 % от номинальных значений. Однако практика эксплуатации показывает, что токовые перегрузки могут существенно превосходить указанные значения и могут достигать 400–500 %. Это обуславливается возможностью возникно-

вения в сетях резонансных явлений, при которых токи могут значительно превышать ток первой гармоники. Данное обстоятельство приводит к необходимости учета возможных резонансов тока и напряжения на одной из гармоник при выборе параметров и места установки конденсаторных батарей.

Таким образом, исследование условий применения конденсаторных установок при наличии в сети нелинейных приемников электрической энергии представляет важное прикладное значение при решении вопросов компенсации реактивной мощности в системах электропитания (СЭС) специальных комплексов военных объектов.

ПОСТАНОВКА И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КОНДЕНСАТОРНЫХ УСТАНОВОК В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ С НЕЛИНЕЙНЫМИ НАГРУЗКАМИ

Используя положения теоретической электротехники и теории электрических цепей, распределительные электрические сети СЭС можно представлять электрической цепью, а для ее анализа и расчета использовать методы, известные из данных научных дисциплин.

Существуют два основных подхода к исследованию различных систем. Первый подход связан с исследованием систем во временной области (исследуются временные характеристики), второй – в частотной области (исследуются частотные характеристики).

Анализ установившихся и переходных процессов в системах электропитания с нелинейными нагрузками также базируется на использовании этих подходов. Первый подход связан с необходимостью решения систем линейных или нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих электромагнитные процессы в системах [4]. На основании решения, которое может быть получено, как правило, только с помощью численных методов, определяются характер изменения и параметры токов и напряжений. Второй подход связан с применением частотного метода, основанного на применении передаточных функций и частотных характеристик [5]. Поскольку речь идет об анализе режимов в распределительной сети СЭС с нелинейными нагрузками с целью определения возможности применения в них конденсаторных батарей, то, очевидно, более предпочтителен второй подход, связанный с применением частотных методов, которые связаны с самой природой передачи гармонических составляющих по электрическим сетям.

Частотный подход является эффективным методом исследования линейных стационарных систем, при котором определяется поведение отдельных элементов или системы в целом при действии на их входе гармонических воздействий. Для анализа таких систем используются передаточные функции по току и напряжению между характерными точками и участками схемы и амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики. Хотя указанный метод разработан и широко применяется для решения задач анализа и синтеза систем автоматического управления, он, вообще говоря, применим и для исследования динамических систем, поведение которых описывается линейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами.

По аналогии с теорией электрических цепей [6] для анализа электрических сетей можно использовать одну из комплексных передаточных функций, которые определяются типом входного воздействия и откликом цепи (сети):

– комплексную передаточную функцию по напряжению:

$$W_u(j\omega) = \frac{\dot{U}_{m2}}{\dot{U}_{m1}} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1}, \quad (1)$$

где \dot{U}_{m1} , \dot{U}_{m2} , \dot{U}_1 , \dot{U}_2 – комплексные амплитуды и комплексные действующие значения напряжения воздействия на входе и напряжения реакции на выходе соответственно;

– комплексную передаточную функцию по току:

$$W_i(j\omega) = \frac{\dot{I}_{m2}}{\dot{I}_{m1}} = \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1}, \quad (2)$$

где \dot{I}_{m1} , \dot{I}_{m2} , \dot{I}_1 , \dot{I}_2 – комплексные амплитуды и действующие значения тока воздействия и тока реакции;

– комплексное передаточное сопротивление:

$$W_z(j\omega) = \frac{\dot{U}_{m2}}{\dot{I}_{m1}} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_1}; \quad (3)$$

– комплексную передаточную проводимость:

$$W_Y(j\omega) = \frac{\dot{I}_{m2}}{\dot{U}_{m1}} = \frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_1}. \quad (4)$$

Как следует из соотношений (1) и (2), передаточные функции $W_u(j\omega)$ и $W_i(j\omega)$ являются безразмерными величинами, а в соответствии с (3) и (4) передаточные функции $W_z(j\omega)$ и $W_Y(j\omega)$ имеют размерности сопротивления и проводимости соответственно.

Имея выражение частотной передаточной функции $W(j\omega)$, несложно получить выражения частотных характеристик:

– амплитудная частотная характеристика определяется выражением $A(\omega) = |W(j\omega)|$;

– логарифмическая амплитудная частотная характеристика определяется выражением $L(\omega) = 20 \lg A(\omega) = 20 \lg |W(j\omega)|$;

– фазовая частотная характеристика имеет вид $\psi(\omega) = \arg W(j\omega)$.

Частотные характеристики дают исчерпывающее описание цепи в частотном представлении. Поэтому знание амплитудной и фазовой частотных характеристик позволит оценить уровень несинусоидальности напряжения в точках подключения нелинейных нагрузок. Это, в свою очередь, позволит определить возможность возникновения резонансных режимов на частотах высших гармоник, оценить их параметры, а при необходимости предусмотреть применение фильтрокомпенсирующих установок и осуществить выбор их параметров.

Для анализа уровней высших гармоник в СЭС исследуемого объекта с целью определения возможности применения компенсирующих устройств необходимо иметь его схему электропитания, сведения о параметрах и режимах работы элементов СЭС, сведения о режимах работы и параметрах линейных и нелинейных нагрузок.

Электрические сети напряжением 6(10)–0,4 кВ¹ являются, как правило, радиальными распределительными сетями, что существенно облегчает применение частотного метода.

Рассмотрим возможности исследования распределительных сетей специальных комплексов с помощью частотного метода на примере простейшей СЭС 6–0,4 кВ, схема которой изображена на рис. 1.

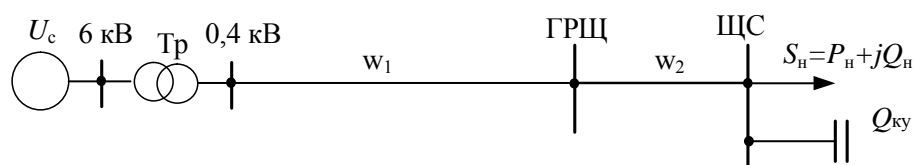


Рис. 1. Схема трехфазной сети 6–0,4 кВ

Схема замещения рассматриваемой распределительной сети с использованием упрощенных схем замещения элементов сети представлена на рис. 2. Параметры трансформатора приведены к вторичной обмотке.

¹ Обозначение электрической сети с одной степенью трансформации с высшим напряжением 6(10) кВ и низшим напряжением 0,4 кВ, принятое в электроэнергетике.

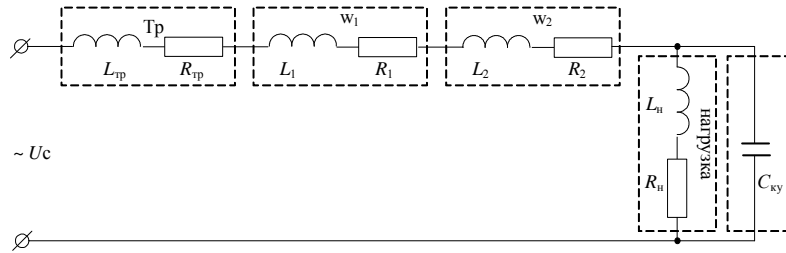


Рис. 2. Схема замещения трехфазной сети 6–0,4 кВ

Получим комплексные передаточные функции для рассматриваемой системы (в предположении, что компенсирующее устройство отключено). Данные передаточные функции и соответствующие им частотные характеристики можно представить в следующем виде:

– для комплексной передаточной функции по напряжению:

$$W_u(j\omega) = W_u(p)|_{p=j\omega} = \frac{\dot{U}_{m2}}{\dot{U}_{m1}} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{z_1(p)}{z_1(p) + z_2(p)} = \frac{k_u(1+T_1p)}{(1+T_2p)};$$

$$L_u(\omega) = 20\lg|W_u(j\omega)| = 20\lg A_u(\omega) = \frac{k_u\sqrt{1+(\omega T_1)^2}}{\sqrt{1+(\omega T_2)^2}};$$

$$\psi_u(\omega) = \arg W_u(j\omega) = \arctg\omega T_1 - \arctg\omega T_2,$$

где k_u – коэффициент передачи, $k_u = R_n / (R_{Tp} + R_1 + R_2 + R_n)$; T_1 – постоянная времени, $T_1 = L_n / R_n$;
 T_2 – постоянная времени, $T_2 = (L_{Tp} + L_1 + L_2 + L_n) / (R_{Tp} + R_1 + R_2 + R_n)$;

– для комплексного передаточного сопротивления:

$$W_z(j\omega) = W_z(p)|_{p=j\omega} = \frac{\dot{I}_{m2}}{\dot{I}_{m1}} = \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} = k_z(1+T_1p);$$

$$L_z(\omega) = 20\lg|W_z(j\omega)| = 20\lg A_z(\omega) = k_z\sqrt{1+(\omega T_1)^2};$$

$$\psi_z(\omega) = \arg W_z(j\omega) = \arctg\omega T_1,$$

где k_z – коэффициент передачи, $k_z = R_n$;
 T_1 – постоянная времени, $T_1 = L_n / R_n$;

– для комплексной передаточной проводимости:

$$W_Y(j\omega) = W_Y(p)|_{p=j\omega} = \frac{\dot{I}_{m2}}{\dot{U}_{m1}} = \frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_1} = \frac{k_Y}{(1+T_2p)};$$

$$L_Y(\omega) = 20\lg|W_Y(j\omega)| = 20\lg A_Y(\omega) = \frac{k_Y}{\sqrt{1+(\omega T_2)^2}};$$

$$\psi_Y(\omega) = \arg W_Y(j\omega) = -\arctg\omega T_2$$

где k_Y – коэффициент передачи, $k_Y = 1 / (R_{Tp} + R_1 + R_2 + R_n)$;
 T_2 – постоянная времени, $T_2 = (L_{Tp} + L_1 + L_2 + L_n) / (R_{Tp} + R_1 + R_2 + R_n)$;

– для комплексной передаточной функция по току:

$$W_i(j\omega) = W_i(p)|_{p=j\omega} = \frac{\dot{I}_{m2}}{\dot{I}_{m1}} = \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} = 1.$$

Следует отметить, что данный подход не является универсальным, так как расчеты для более сложных систем электроснабжения в математическом плане могут быть весьма громоздкими. В связи с этим особое значение получают исследования частотных характеристик действующих СЭС, основанные на применении методов математического моделирования.

Рассматриваемая задача может быть успешно решена с помощью широко используемого в настоящее время программного продукта MatLab и его расширений Simulink и

SimPowerSystems, предназначенных для моделирования электроэнергетических и электротехнических устройств. Блок Powergui в составе SimPowerSystems является инструментом графического интерфейса пользователя и обеспечивает решение ряда важных в рассматриваемой области задач [7]. На рис. 3 представлена математическая модель, соответствующая схеме замещения (рис. 2) рассматриваемой системы, полученная с использованием элементов библиотек SimPowerSystems и Simulink.

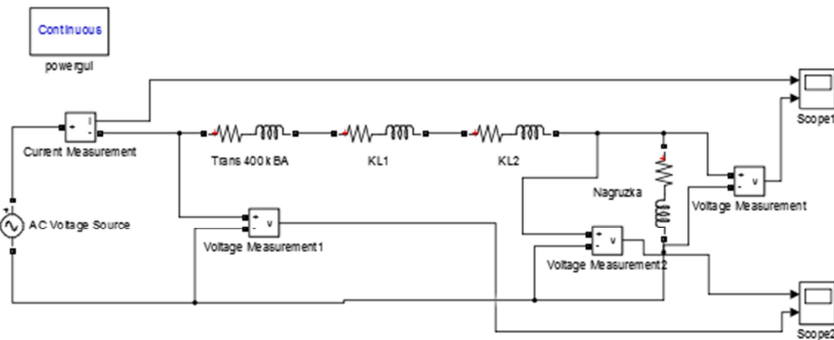


Рис. 3. Модель сети 6–0,4 кВ в среде Simulink

На рис. 3 источник переменного напряжения амплитудой $\sqrt{3} \cdot 400$ В и частотой 50 Гц подключается к цепи с параметрами: трансформатор 400 кВА – $R_{\text{тр}} = 5,5 \cdot 10^{-3}$ Ом; $L_{\text{тр}} = 5,4 \cdot 10^{-5}$ Гн; кабельная линия $w_1 - R_1 = 0,0425$ Ом; $L_1 = 4,77 \cdot 10^{-5}$ Гн; кабельная линия $w_2 - R_2 = 0,012$ Ом; $L_1 = 1,15 \cdot 10^{-5}$ Гн; нагрузка – $R_{\text{н}} = 1,28$ Ом; $L_{\text{н}} = 3,1 \cdot 10^{-3}$ Гн. Для этих исходных данных $T_1 = 2,42 \cdot 10^{-3}$ с; $T_2 = 2,40 \cdot 10^{-3}$ с; $k_u = 0,955$; $k_z = 1,28$ Ом.

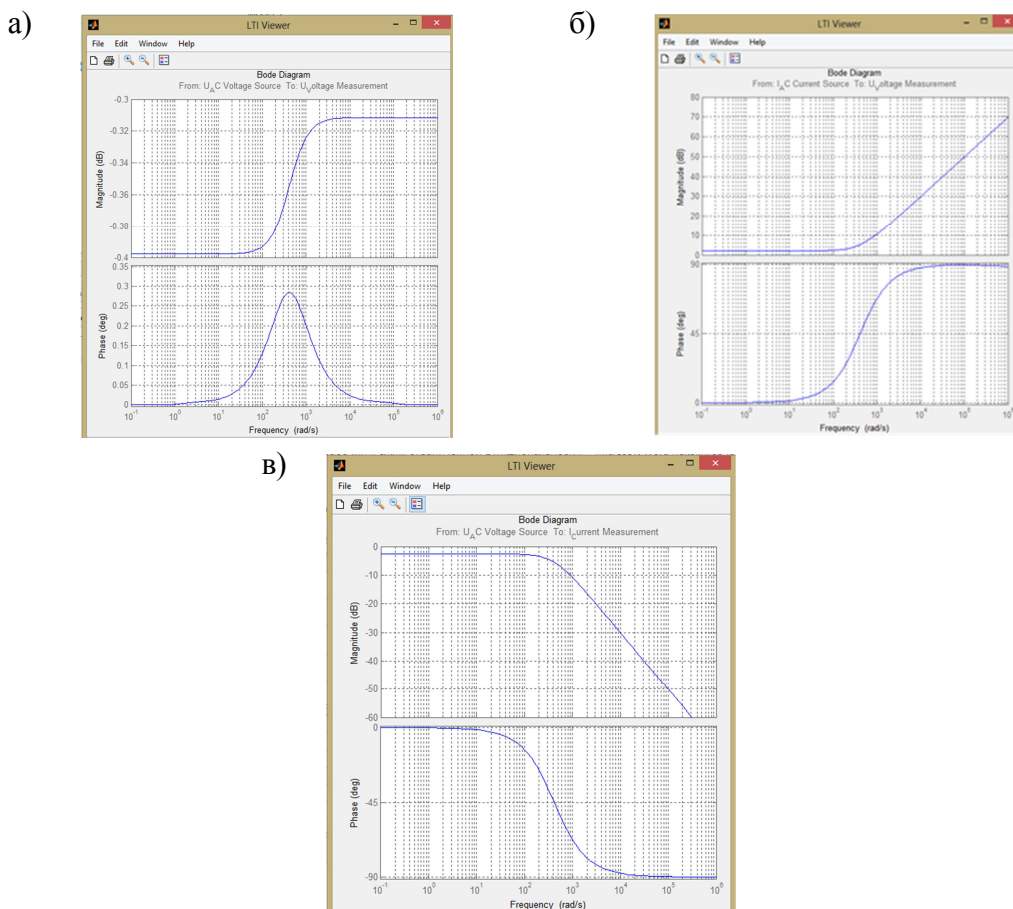


Рис. 4. Логарифмические амплитудные и фазовые частотные характеристики сети 6–0,4 кВ

С помощью инструмента Simulink LTI-Viewer получены логарифмические амплитудные и фазовые частотные характеристики (Bode Diagram), показанные на рис. 4 и соответствующие передаточным функциям $H_u(j\omega)$ (рис. 4,а), $H_z(j\omega)$ (рис. 4,б) и $H_Y(j\omega)$ (рис. 4,в). Представленные логарифмические амплитудные и фазовые частотные характеристики полностью совпадают с аналогичными характеристиками, которые представлены в виде графиков, построенных по полученным для них аналитическим выражениям, что свидетельствует о достоверности полученных результатов.

Частотные характеристики сети, не содержащей емкостные элементы (компенсирующие устройства отсутствуют или отключены), имеют монотонный характер, что объясняется наличием в цепи только в соответствии с принципом эквивалентности [6] пассивного резистора и индуктивного сопротивления.

Включение емкостного элемента (компенсирующего устройства) резко меняет характер частотных характеристик питающей сети. На рис. 5 представлены логарифмические частотные характеристики для комплексной передаточной функции по напряжению (рис. 5,а) и для комплексной передаточной проводимости (рис. 5,б) для рассматриваемой сети при подключении параллельно нагрузки емкостного элемента (см. рис. 2). Характер частотной характеристики объясняется тем, что при включении батарей конденсаторов в сеть образуется параллельный LC -контур, состоящий из индуктивного сопротивления нагрузки (возможно с учетом индуктивного сопротивления линии) и емкостного сопротивления конденсаторов, накапливающих энергию магнитного и электрического полей соответственно.

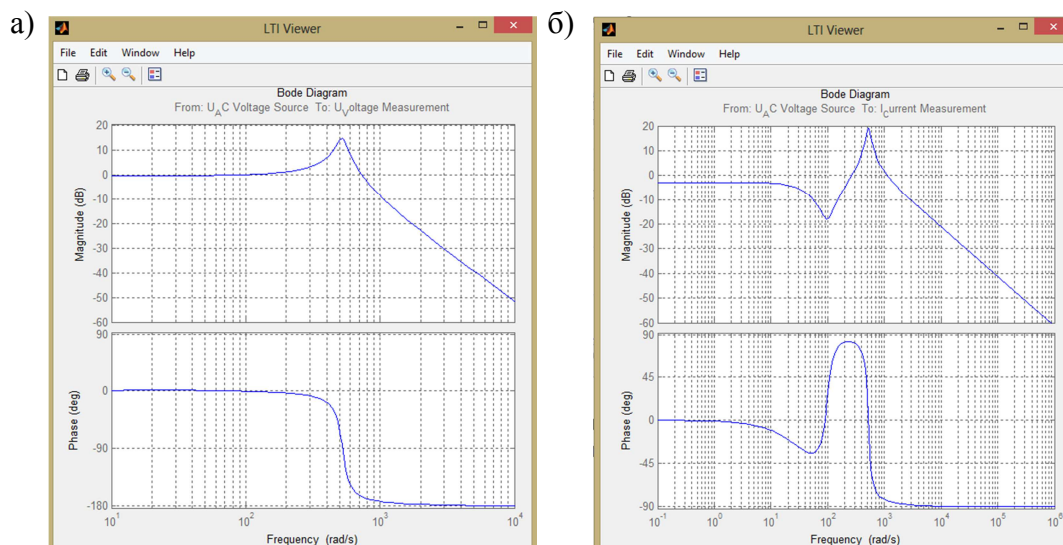


Рис. 5. Логарифмические частотные характеристики сети 6–0,4 кВ

Образование параллельного LC -контура может привести к возникновению резонанса токов в параллельных ветвях и, как следствие, к токовым перегрузкам конденсаторов на частотах высших гармоник, возникающим в сетях с нелинейными нагрузками.

Оценка влияния высших гармоник на несинусоидальность напряжения сети требует расчета уровней высших гармоник в электрических сетях [8, 9]. Эти результаты можно получить путем расчета установившегося режима работы сети с нелинейными нагрузками. При этом помимо допущений о симметричности и линейности схемы принимают следующие допущения [10]:

- сопротивления элементов сети токам высших гармоник прямой и обратной последовательностей принимаются одинаковыми;
- причинами появления в сети высших гармоник выступают симметричные трехфазные нагрузки, имеющие нелинейные вольт-амперные характеристики.

Указанные допущения позволяют, используя принцип наложения, рассматривать режим для каждой гармоники независимо от режимов других гармоник.

Имея частотные характеристики сети и спектр высших гармоник, возникающих в СЭС при подключении нелинейных нагрузок, можно оценить условия работы оборудования электрических сетей и выработать технические мероприятия, обеспечивающие электромагнитную совместимость приемников электроэнергии с питающей электрической сетью.

Следует отметить, что для сетей с большим количеством элементов и сложной конфигурацией такие расчеты возможны только при применении методов математического моделирования с помощью ЭВМ и современных программных продуктов. Так, возможности Simulink и SimPowerSystems позволяют имитировать работу различных электрических устройств и систем во временной области, решать задачи анализа и определять свойства отдельных участков и СЭС в целом в частотной области (построение частотных характеристик), а также возможно проведение гармонического анализа сигналов [7].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Задача повышения качества электроэнергии и обеспечения электромагнитной совместимости в системе электроснабжения специальных объектов может быть успешно решена с использованием достоверной информации о частотных характеристиках этих систем, которая может быть получена на основе применения рассмотренного в статье частотного метода, а также с использованием методов математического моделирования.

Список используемых источников

1. *Карагодин В.В.* Автоматизация систем электроснабжения специальных объектов: учебник – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2017. – 326 с.
2. *Карагодин В.В., Рыбаков Д.В.* Оптимизация размещения устройств компенсации реактивной мощности в распределительных электрических сетях специальных объектов // Известия вузов. Приборостроение. – 2015. – Т. 58, № 10. – С. 823–829.
3. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. – Новосибирск: Норматика, 2016. – 192 с.
4. *Горюнов В.Н., Дед А.В.* Методы расчета электрических цепей, содержащих нелинейные элементы // Энергетика. Омский научный вестник. – Омский государственный технический университет. – 2008. – № 1 (64). – С. 75–77.
5. *Трофимов Г.Г., Банченко Ю.И.* Расчет уровней высших гармоник в системах электроснабжения промышленных предприятий по передаточным функциям и частотным характеристикам // IV Всесоюзное совещание по качеству электрической энергии. Винница: тез. докл. – Киев: ФОЛ Института электродинамики АН УССР, 1978. – Ч. 3. – С. 60–62.
6. *Бакалов В.П., Дмитриков В.Ф., Крук Б.И.* Основы теории цепей: учебник для вузов / под ред. В.П. Бакалова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 597 с.
7. *Черных И.В.* Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
8. *Гераскин О.Т., Черепанов В.В.* Применение вычислительной техники для расчета высших гармоник в электрических сетях. – М.: ВИПКэнерго, 1987. – 53 с.
9. *Черепанов В.В., Черепанова В.А.* Методы расчета и контроля показателей качества электрической энергии. – Горький: ГГУ, 1982. – 92 с.
10. Избранные вопросы несинусоидальных режимов в электрических сетях предприятий / И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко, В.В. Нестерович и др.; под ред. И.В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 296 с.

А.В. Мирошниченко

Департамент Министерства обороны Российской Федерации по обеспечению государственного оборонного заказа Министерства обороны Российской Федерации, г. Москва;

А.В. Филатов,

кандидат техн. наук

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

Д.А. Харебин

АО «Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца», г. Москва

ВРЕМЕННАЯ МОДЕЛЬ РЕЖИМОВ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Предложена временная модель функциональной эксплуатации сложных технических систем на примере радиолокационной станции дальнего обнаружения и ее формализованное описание. Данная модель позволяет выявить интервалы и длительность времени, в которые недопустимо или нецелесообразно использовать штатную аппаратуру станции для тренировки боевых расчетов.

Ключевые слова: учебно-тренировочные средства, режимы работы, подготовка военных специалистов, радиолокационная станция дальнего обнаружения, обучаемые, модель, военные специалисты.

Для того чтобы организовать качественную подготовку военных специалистов ракетно-космического вооружения, эксплуатирующих сложные технические системы, например радиолокационные станции дальнего обнаружения (РЛС ДО) в войсках, необходима целенаправленная и непрерывная подготовка боевых расчетов с использованием передовых форм процесса обучения. Сегодня она реализуется с применением тренажерных систем и комплексов.

Основными задачами подготовки боевых расчетов являются:

- обучение номеров боевых расчетов умелым и слаженным действиям при выполнении обязанностей на боевых постах в мирное и военное время;
- совершенствование профессиональной подготовки номеров боевых расчетов и повышение их личной выучки при решении задач боевого дежурства [1].

Основу подготовки боевых расчетов к несению боевого дежурства составляют обучение и проверка готовности по следующим направлениям:

- выполнение специальных обязанностей при решении задач боевого дежурства;
- поддержание станций дежурных сил в готовности к применению по предназначению;
- оперативное выявление и устранение возникающих неисправностей;
- предотвращение аварийных и чрезвычайных ситуаций, выполнение первоочередных мероприятий по ликвидации их последствий;
- выполнение требований руководящих документов, определяющих правила и меры безопасности при эксплуатации РЛС ДО [2].

К числу основных задач, возлагаемых на боевые расчеты РЛС ДО, можно отнести следующие:

- ведение боевой работы на средствах дежурных сил в пределах их боевых возможностей, своевременное доведение руководящему составу приказов (сигналов, распоряжений) на приведение воинской части в установленные степени боевой готовности;
- управление дежурными силами и средствами при их применении по предназначению;
- поддержание технологической аппаратуры и специального технического оборудования в установленных режимах функционирования и видах управления, своевременное устранение неисправностей на вооружении;

– обеспечение бесперебойного снабжения аппаратуры и оборудования электроэнергией, водой, воздухом заданных параметров, поддержание установленного температурно-влажностного режима;

– проведение ежедневного, еженедельного технического обслуживания аппаратуры и оборудования, направленное на поддержание работоспособности изделия и обеспечение готовности к применению по назначению.

Наиболее эффективным способом поддержания уровня подготовки военных специалистов в войсках является использование на всех этапах подготовки штатных изделий военной техники для различных тренировок боевых расчетов. Однако, несмотря на высокую загруженность штатной аппаратуры РЛС ДО, ее использование ограничено и ведет к быстрому расходу ресурса боевой техники. Кроме того, в ходе боевого дежурства запрещено в целях обучения изменять режимы штатной аппаратуры РЛС ДО, поэтому возникает необходимость определения временных интервалов, когда невозможно использовать штатную аппаратуру в целях тренажа. Определение таких интервалов времени требует:

– анализа технической документации на изделие, руководящих документов по организации и несению боевого дежурства и других документов регламентирующих подготовку военных специалистов;

– знания всех режимов функционирования аппаратуры, видов и способов управления РЛС ДО;

– выявления интервалов времени, в которые предусмотрены мероприятия планового технического обслуживания;

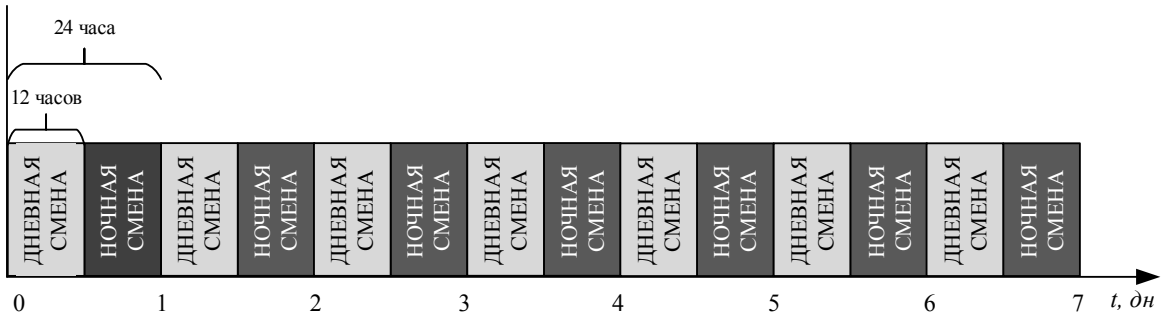
– выявления интервалов времени для других видов подготовки (пожарной тренировки, физической тренировки и др.) боевых расчетов в период несения боевого дежурства.

Несение боевого дежурства на РЛС ДО представляет собой непрерывный процесс, в котором длительность дежурной смены составляет 12 ч., при этом дежурство организовано в две смены: ночную и дневную (рис. 1,а).

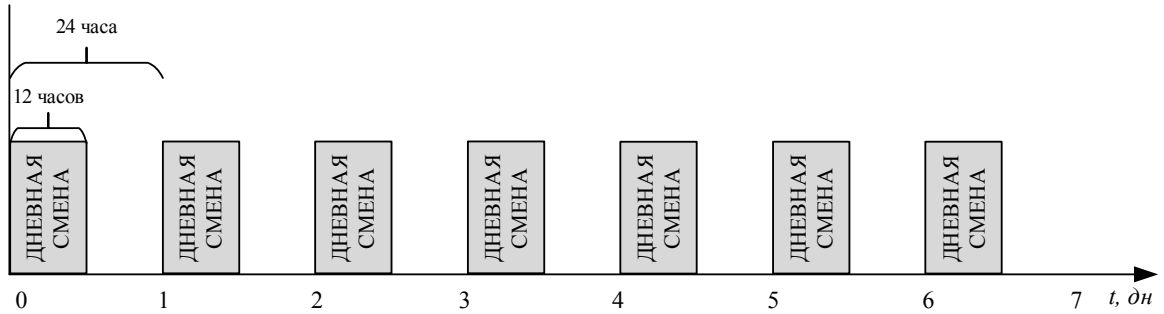
Подготовка номеров боевых расчетов к несению боевого дежурства проводится перед заступлением на боевое дежурство и совершенствуется в ходе его несения, однако во время ночной смены личный состав подразделения не имеет возможности осуществлять подготовку ввиду регламента служебного времени, поэтому далее будем рассматривать только возможности использования штатной аппаратуры РЛС ДО в дневную смену и в установленные расписанием дня интервалы времени (рис. 1,б).

Анализ мероприятий боевого дежурства и временных интервалов (рис. 1,в), предусмотренных для непосредственной подготовки боевых расчетов в период несения боевого дежурства, позволяет выявить отрезки времени t_{BBT} со своей длительностью τ_{BBT} , когда недопустимо применять штатную аппаратуру станции для тренировки, так как в это время осуществляется предусмотренная регламентом дежурной смены индивидуальная тренировка номеров расчетов, уже заступивших на боевое дежурство, кроме того, нецелесообразно проводить подготовку из-за маленьких значений длительности τ_{BBT} (рис. 1,г). Так происходит от смены к смене, с периодом T в промежутке времени от 0 до ∞ . Периодичность заступления БР и цикличность операций боевой работы на РЛС ДО представлена на рис. 2 и описывается следующим выражением:

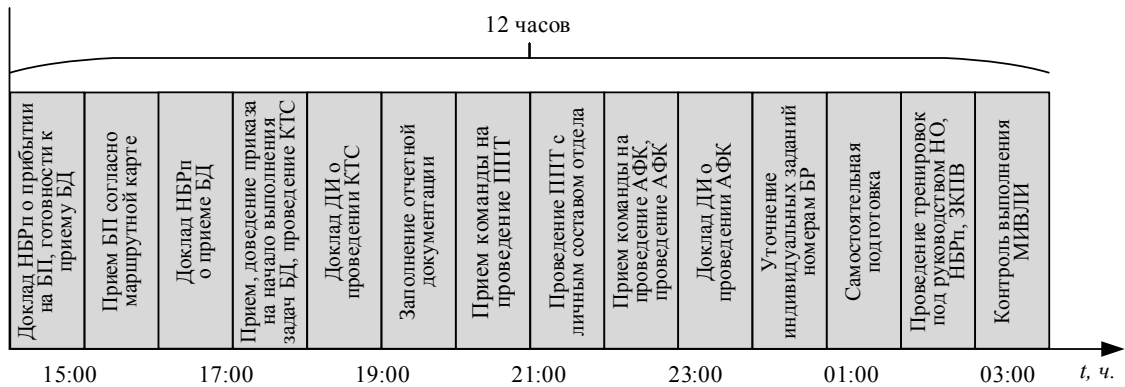
$$Y_{\text{BBT}}(t) = \begin{cases} 1(t - t_{t1}^{\text{BBT}} - nT) - 1(t - t_{t1}^{\text{BBT}} - nT - \tau_{t1}^{\text{BBT}}), \\ 1(t - t_{t2}^{\text{BBT}} - nT) - 1(t - t_{t2}^{\text{BBT}} - nT - \tau_{t2}^{\text{BBT}}), \\ 1(t - t_{t3}^{\text{BBT}} - nT) - 1(t - t_{t3}^{\text{BBT}} - nT - \tau_{t3}^{\text{BBT}}), \\ \dots \\ 1(t - t_{tn}^{\text{BBT}} - nT) - 1(t - t_{tn}^{\text{BBT}} - nT - \tau_{tn}^{\text{BBT}}). \end{cases}$$



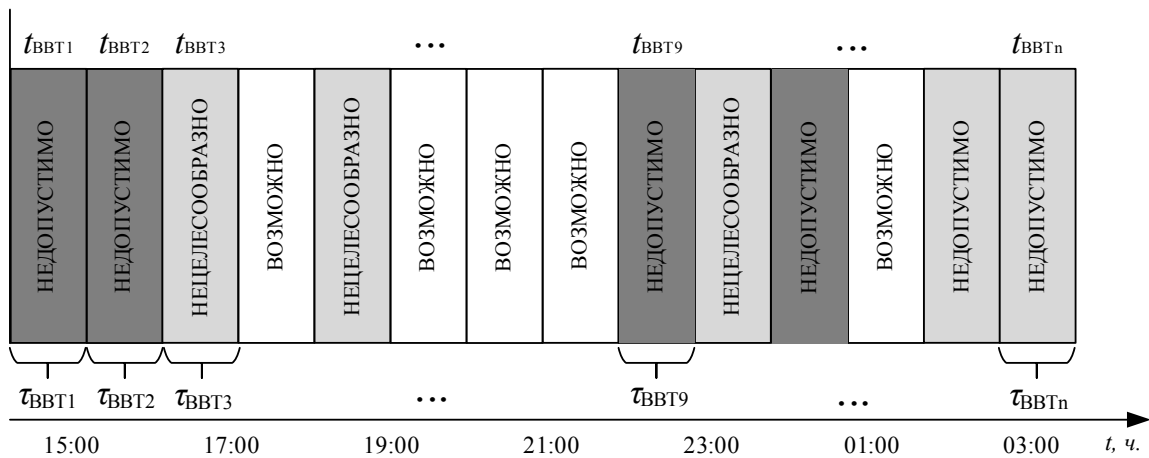
а)



б)



в)



г)

Рис. 1. Периодичность заступления БР и цикличность операций боевой работы на РЛС ДО: а – периодичность дежурных смен; б – периодичность дневных смен; в – мероприятия боевого дежурства; г – определение возможности использования станции для тренировки боевых расчетов

где $Y_{\text{ВВТ}}(t)$ – функция, описывающая последовательность временных интервалов на заданном количестве периодов T ;
 $t_{t1}^{\text{ВВТ}}$ – начало i -го интервала времени;
 $\tau_{t1}^{\text{ВВТ}}$ – длительность i -го интервала времени;
 n – номер периода.

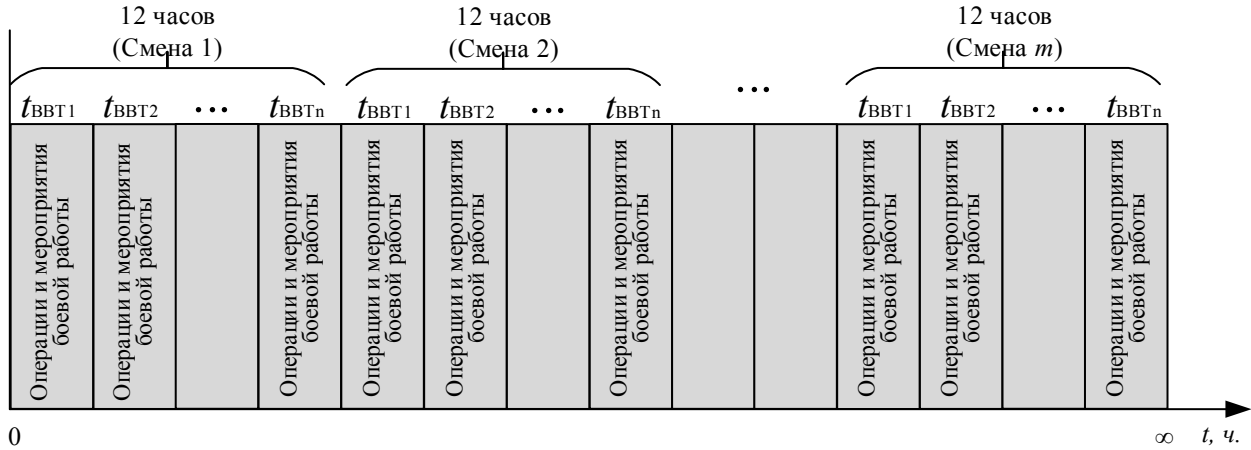


Рис. 2. Периодичность заступления и цикличность операций боевой работы на РЛС ДО

В общем виде временная модель функциональной эксплуатации штатной аппаратуры РЛС ДО с учетом периодически повторяющихся с разными периодами T , интервалами $t_{\text{ВВТ}}$ и длительностью $\tau_{\text{ВВТ}}$ отрезков времени, представлена выражениями:

$$X_{\text{ВВТ}} = \{(t_{t1}^{\text{ВВТ}}, \tau_{t1}^{\text{ВВТ}}); (t_{t2}^{\text{ВВТ}}, \tau_{t2}^{\text{ВВТ}}); \dots (t_{ti}^{\text{ВВТ}}, \tau_{ti}^{\text{ВВТ}}); \dots (t_{tm}^{\text{ВВТ}}, \tau_{tm}^{\text{ВВТ}})\};$$

$$Y_{\text{ВВТ}}(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \left(\sum_{i=1}^m [1(t - t_{ti}^{\text{ВВТ}} - nT) - 1(t - t_{ti}^{\text{ВВТ}} - nT - \tau_{ti}^{\text{ВВТ}})] \right);$$

где $X_{\text{ВВТ}}$ – множество интервалов времени, во время которых невозможно проведение тренировки с боевым расчетом на заданном периоде T ;
 $t_{ti}^{\text{ВВТ}}$ – длительность i -го интервала времени;
 n – номер периода;
 $Y_{\text{ВВТ}}(t)$ – функция, описывающая последовательность временных интервалов на заданном количестве периодов T .

На основе проведенных исследований, анализа функциональной эксплуатации РЛС ДО и штатного распорядка дня лиц боевого расчета при несении боевого дежурства получены временные графики работы РЛС ДО (рис. 3).

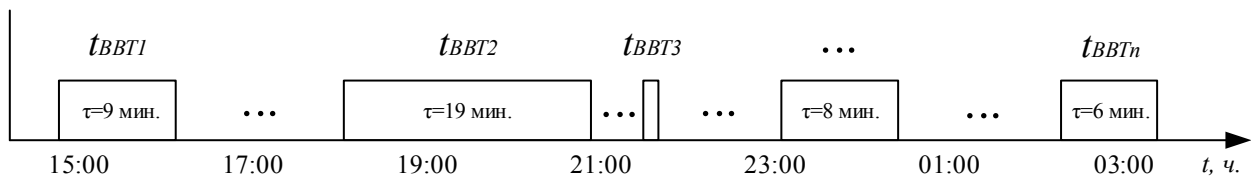


Рис. 3. Определение количества, длительности и последовательности временных интервалов для организации тренажной подготовки БР

Определение количества, длительности и последовательности временных интервалов позволит использовать штатную аппаратуру РЛС ДО для повышения уровня подготовки и слаженности боевого расчета как во время несения боевого дежурства, так и в период непосредственной подготовки.

Список используемых источников

1. Наставление по боевой подготовке в Вооруженных силах Российской Федерации: утверждено приказом Министра обороны № 760. – МО РФ, 2013.
2. Руководство по боевой подготовке Воздушно-космических сил: утверждено приказом Главнокомандующего ВКС № 690. – МО РФ, 2017.

Е.Л. Лебедев,
доктор техн. наук, профессор;
А.С. Перфильев,
кандидат техн. наук, доцент;
А.Э. Султанов,
кандидат техн. наук

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИОННОГО НАГРУЖЕНИЯ КОРПУСА РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ КАК ФАКТОРА ПОВЫШЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ВЫРАБОТКИ РЕСУРСА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТОПЛИВНЫХ БАКОВ

Рассмотрены потенциальные условия ускоренного развития трещин в различных сечениях обечаек несущих баков ракет-носителей при воздействии на них комбинированного низкочастотного и высокочастотного вибрационного нагружения в процессе полета. Представлены результаты анализа характера изменения во времени деформаций в различных сечениях ракеты-носителя с учетом особенностей реализации собственных продольных колебаний корпуса. Отмечена потенциальная опасность наложения средне- и высокочастотных колебаний от двигателя в отношении ускоренного развития трещин в поперечных стыках обечаек топливных баков первой ступени.

Ключевые слова: ракета-носитель, продольная вибрация, развитие трещин, ресурс, обечайки баков.

ВВЕДЕНИЕ

При изготовлении современных отечественных ракет-носителей (РН) используют хорошо зарекомендовавшую себя ранее в других отраслях промышленности сварку трением с перемешиванием. Такой технологический процесс применяют для изготовления обечаек несущих баков ракетных блоков большого удлинения, сваривая их из отдельных секций. Данная технология по многим показателям опережает классическую технологию расплавлением. Вместе с тем характерным недостатком применения сварки трением с перемешиванием является потенциальная опасность образования скрытых и неустраняемых на стадии производства трещин в поперечных стыках элементов обечаек топливных баков [1].

Возможность наличия указанного дефекта требует пересмотра подходов к обеспечению работоспособности и долговечности несущих баков, выполняющих функцию несущих силовых элементов конструкции РН. Подвергаясь сложному вибрационному нагружению, трещины в сварных швах могут значительно развиться за время работы двигателя, что повлияет на работоспособность бака. Это существенно повышает риск потери герметичности баков, как элементов двигательной установки, и потери несущей способности, если рассматривать несущие баки в качестве силовых элементов корпуса.

Актуальность исследований в данном направлении связана со сложностью и возможной нестабильностью от пуска к пуску амплитуд динамического вибрационного нагружения корпуса РН в полете при использовании двигателей с дожиганием. Сложный характер такого нагружения обечаек топливных баков связан с действием одновременно как продольных, так и поперечных колебаний, а также ряда вынуждающих сил: от плесканий жидкости в баках, от пульсации тяги двигателя; от нестационарного и квазигармонического аэродинамического нагружения.

На сегодняшний день единого исчерпывающего подхода к достоверной оценке интенсивности развития трещин в указанных типах сварных швов баков и, как следствие, времени выработки ресурса корпуса не разработано. Все это указывает на актуальность дальнейшего анализа условий ускоренного развития трещин в подобных топливным бакам конструктив-

ных элементах РН. Значимым представляется дальнейший сбор и систематизация данных о механизме ускоренного развития трещин в сварных соединениях топливных баков при учете особенностей вибрационного нагружения в различных поперечных сечениях РН.

С учетом специфики указанного вопроса основной акцент при анализе вибрационного нагружения смещен от самих амплитуд колебаний к оценке реализующихся под их влиянием изменений во времени напряжений в материале обечайки бака. Для упрощения в данной работе в качестве некоторого эквивалента колебаний напряжения $\sigma = \sigma(t)$ используются колебания относительных осевых деформаций поперечных сечений баков $\varepsilon_x = \varepsilon_x(t)$.

В настоящее время существует гипотеза о влиянии наложения на низкочастотные колебания напряжений в металле определенной высокочастотной составляющей. В работе [1] отмечается значительное (в разы) сокращение малоциклового ресурса испытываемого образца при наложении двух возмущающих воздействий с соотношением частот 1/200. При этом важно, что материал должен подвергаться определенной статической нагрузке, смещающей среднее значение напряжения относительно нулевого значения, как это показано на схеме, изображенной на рис. 1.

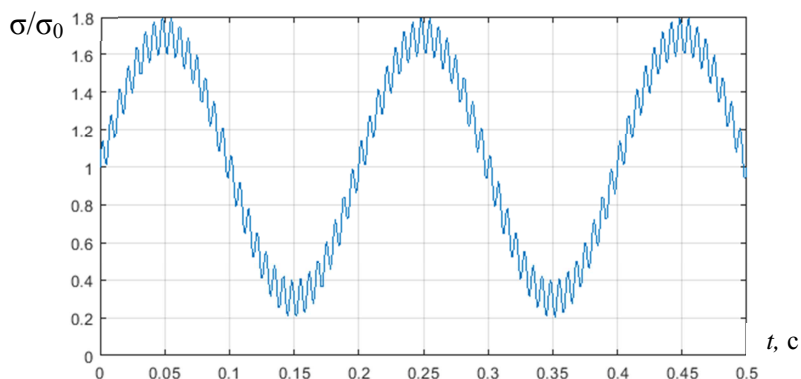


Рис. 1. Характер изменения во времени напряжений в элементах конструкции при сложном динамическом нагружении

Данный тип напряженно-деформированного состояния типичен для обечаек топливных баков РН, испытывающих нагружение от комбинации низкочастотных колебаний растяжения-сжатия всего корпуса под действием массовых сил инерции, а также вибрационного нагружения от источников высоко- и среднечастотных колебаний, сопровождающих работу маршевого двигателя в хвостовой части нижней ступени.

СТРУКТУРА ВИБРАЦИОННОГО НАГРУЖЕНИЯ ОБЕЧАЕК ТОПЛИВНЫХ БАКОВ

В процессе функционирования ракеты-носителя в ней формируются разного рода упругие колебания различной природы. Часть из них локализуется в относительно ограниченном пространстве в масштабе одного отсека либо агрегата. Другие колебания, напротив, охватывают весь корпус и с примерно одинаковыми амплитудами проявляются в различных частях РН.

Высокочастотные колебания (ВЧ) с частотами от 1 кГц как правило проявляют себя в виде колебаний относительной деформации элементов конструкции в относительно малом масштабе. При этом распространение таких колебаний носит характер сферических волн растяжения-сжатия материала конструкции и проявляет себя однотипно во всех направлениях (осях координат). На характер распространения таких колебаний существенно влияют

особенности конструкции агрегатов, их компоновка в отсеках. Поэтому при рассмотрении влияния ВЧ колебаний на выработку ресурса сварных швов в баках необходимо учитывать конструктивные особенности РН.

Низкочастотные колебания (НЧ) однотипно проявляются в РН различного класса. Вместе с тем специфика распределения массы и жесткости по длине корпуса ракеты, а также формы днищ баков, влияющих, в частности, на жесткость подвеса массы топлива, может значительно изменить формы продольных колебаний и, как следствие, характер нагружения обечайки бака.

Общая структура частот низкочастотных колебаний корпуса РН в полете представлена на рис. 2 [2]. На рисунке условными обозначениями отмечены следующие частоты: I – жидкость в магистрали окислителя (с учетом демпфера); II – корпус, продольные колебания (1, 2, 3, 4 – номер тона); III – плескание топлива в баках (первый тон); IV – корпус, поперечные колебания (1, 2, 3, 4 – номер тона); V – корпус, крутильные колебания (1, 2, 3 – номер тона).

Характерным является то, что распределение энергии колебаний корпуса РН носит выраженный узкополосный характер. При этом такие процессы, как плескание жидкости в баках, определяющие изгибные колебания корпуса, могут накладываться на частоты продольных колебаний от взаимодействия с двигателем. Верхняя граница низкочастотного диапазона для большинства современных РН лежит в диапазоне до 100 Гц. В то же время указанные низкочастотные колебания дополняются средне- (до 500 Гц) и высокочастотными (до 15 кГц) колебаниями от агрегатов маршевого двигателя (пульсация тяги, колебания давления в газогенераторе и турбонасосном агрегате и др.).

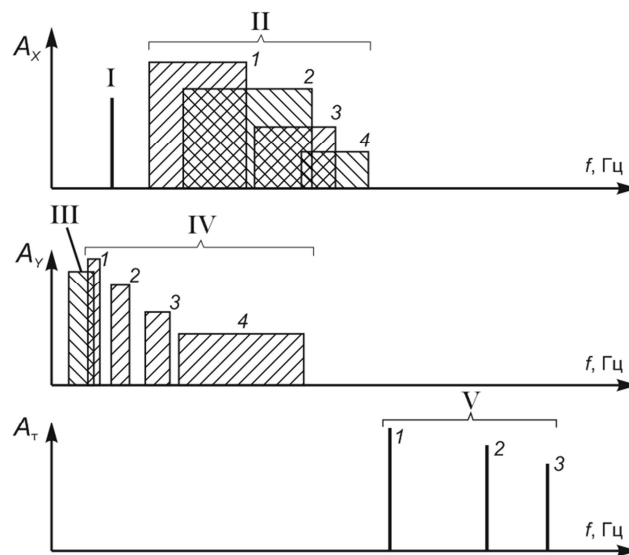


Рис. 2. Структура спектра низкочастотных колебаний корпуса РН:
а – продольные; б – поперечные (изгибные); в – крутильные

Из вышесказанного можно сделать вывод, что характер вибрационного нагружения обечайки баков зависит как от расположения бака в ракете, так и удаленности его от работающего маршевого двигателя.

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРА ДЕФОРМАЦИИ КОРПУСА РАКЕТЫ В РЕЗУЛЬТАТЕ ПРОДОЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ КОРПУСА

Ракета-носитель в процессе полета как колебательная система существенно изменяет свои динамические свойства. Причиной этому является выработка значительной части топлива из

баков окислителя и горючего и, как следствие, перераспределение массы по ее длине. В условиях практически неизменной жесткости корпуса снижение массы хвостовой части ракеты приводит к монотонному возрастанию частоты первых двух-трех форм собственных продольных колебаний. Для созданных РН характеристика частот колебаний хорошо известна и поддается численному определению с привлечением как аналитических, так и сеточных методов модального анализа. Сами значения частот и характер их изменения по времени полета являются для каждой конкретной ракеты-носителя достаточно стабильными характеристиками. Вместе с тем некоторые отклонения в фактических значениях параметров жесткости отдельных элементов корпуса РН, в частности – топливных баках, могут заметно перераспределить энергию упругих механических колебаний. Это может стать причиной значимого роста амплитуды низкочастотной составляющей колебаний напряжения в обечайке баков.

При проведении исследований с использованием математических моделей анализировалось влияние формы продольных колебаний корпуса РН, а также их эволюции в процессе работы ступени на колебания относительной деформации в различных частях топливных баков. В качестве объекта моделирования была выбрана РН легкого класса с тандемной схемой компоновки ступеней. Характер изменения во времени частот первых трех форм продольных колебаний показан на рис. 3 [3].

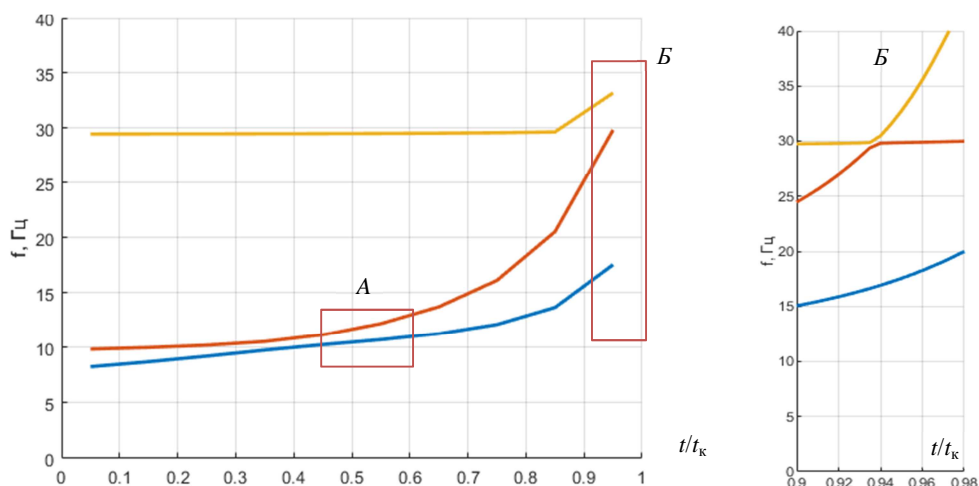


Рис. 3. Изменение частот продольных колебаний корпуса РН (для участка работы первой ступени)

Наиболее характерным для рассматриваемых частот является наличие последовательного перехода из одной формы продольных колебаний в другую: сначала – перехода из первой во вторую (область А), далее – перехода из второй в третью (область В). Графически эти переходы проявляются как сближения либо пересечения соответствующих графиков между парными. Важно отметить, что смена характера колебаний в соответствии с формой определяет условия для взаимного перемещения соответствующих поперечных сечений корпуса, а значит, и напряжения в материале его оболочек.

Изменение вида первых двух форм колебаний представлено на рис. 4. Видно, что наиболее значительное изменение характерно для первой формы колебаний в течение первой трети от полного времени работы ступени. Это изменение связано с интенсивным перераспределением массы по длине корпуса при выработке окислителя и горючего из баков.

Данному этапу свойственна безузловая схема (вид) колебаний, при которой в основном перемещается верхняя часть РН относительно хвостовой. Учитывая большую величину инерционной нагрузки, при полных баках создаются условия для большой сжимающе-растягивающей силы, приводящей к наибольшим деформациям в корпусе первой ступени.

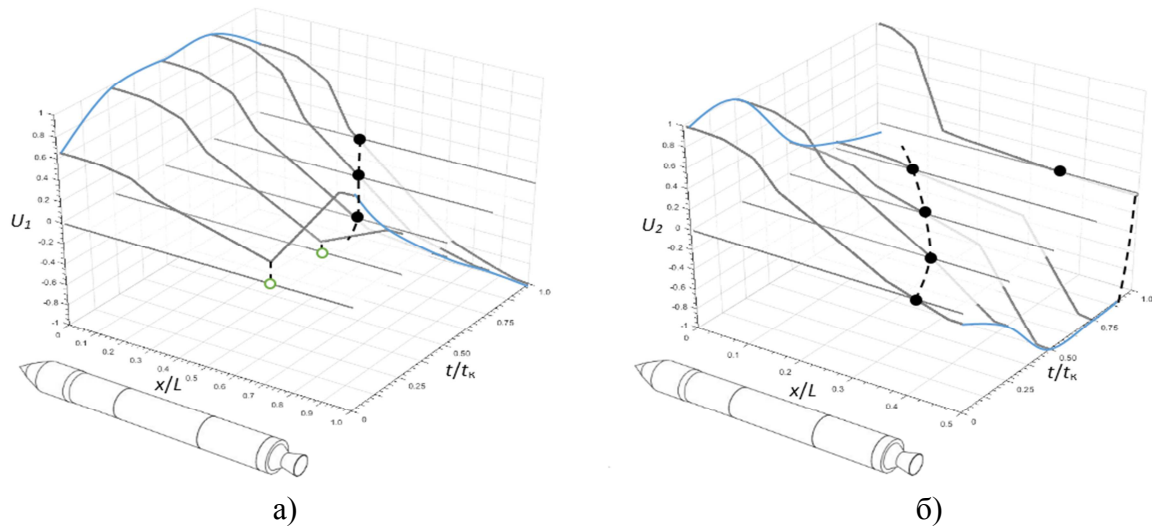


Рис. 4. Изменение форм продольных колебаний корпуса РН во времени (моделирование):
 а – первая форма собственных колебаний; б – вторая форма собственных колебаний

Для современных РН как правило характерно меньшее значение продольной жесткости корпуса верхней ступени относительно обечаек баков первой ступени. Это также способствует росту амплитуд деформации головной части ракеты. Наиболее сильно это проявляется на частоте первой моды колебаний корпуса (рис. 5,а). Вместе с тем по абсолютным значениям напряжения (деформации dU/dx) наиболее вибронегруженным элементом корпуса является нижний бак (горючего) первой ступени (рис. 5,б).

Для более детального количественного анализа и оценки характера распределения по длине РН амплитуд осевой деформации, а также напряжения в материале оболочек корпуса (баков), кривые форм колебаний были продифференцированы по оси X .

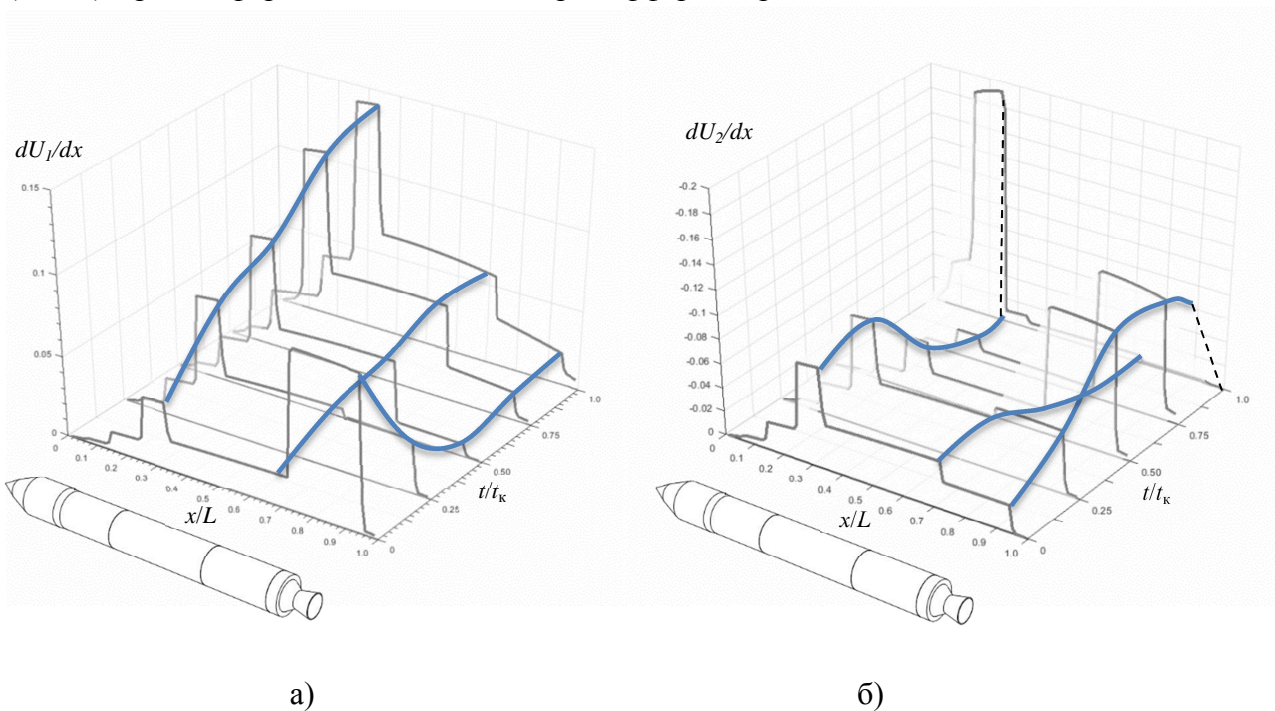


Рис. 5. Изменение амплитуд относительной деформации от продольных колебаний во времени:
 а – первая форма; б – вторая форма

Из графиков видно, что характер относительной деформации от продольных колебаний для баков окислителя (верхнего) и горючего (нижнего) существенно отличается и заметно меняется с течением времени работы ступени.

Количественные оценки соотношения напряжений от колебаний на частотах первой и второй форм наглядно представлены на рис. 6. Штрих-пунктирной линией показана суммарная деформация от обеих форм колебаний. Обращает на себя внимание тот факт, что, несмотря на существенное различие в характере изменения амплитуд деформации на различных частотах, суммарное значение этих амплитуд остается практически неизменным. Этот эффект справедлив для обоих баков первой ступени.

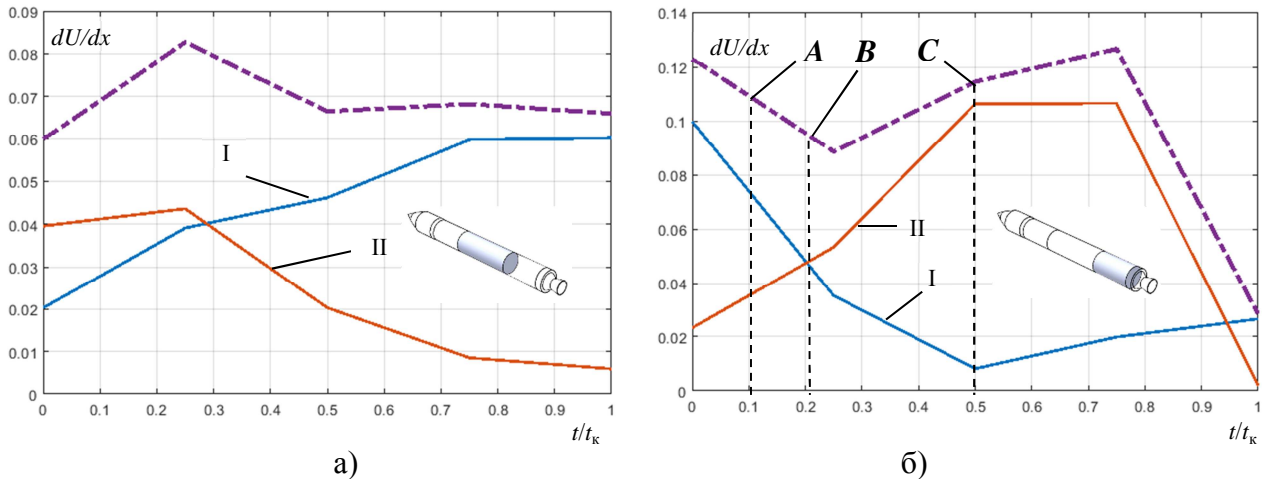


Рис. 6. Изменение амплитуд деформации от колебаний на первых двух частотах собственных колебаний корпуса РН: а – для обечайки бака окислителя; б – для обечайки бака горючего

Для оценки характера вибрационного нагружения сварных швов наиболее нагруженного бака горючего было выполнено воспроизведение временной зависимости результирующей деформации с учетом того, что для различных моментов времени работы ступени частоты f_1 и f_2 изменяются по закону, представленному на рис. 1. Из рис. 6. видно, что, несмотря на практически неизменное значение суммарной деформации, зависимость результирующей от времени существенно изменяется. Особенно это заметно для состояния, когда к середине времени работы ступени РН амплитуда деформации на частоте второй формы колебаний начинает превалировать над амплитудой от первой формы.

На рис. 7 показаны временные зависимости (осциллограммы) изменения продольной деформации dU/dx обечайки бака, синтезированные по амплитудам первых двух форм колебаний, характерные для различных этапов работы двигателя первой ступени. Из графиков видно, что на первом этапе ($t/t_k < 0,2$) реализуется форма динамического нагружения по типу биения, свойственного наличию двух доминирующих гармоник колебаний с близкими частотами.

На этапе полета РН при $t/t_k = 0,5$ реализуется форма динамического нагружения, близкая по параметрам к простому гармоническому сигналу. При этом амплитуда колебаний достигает максимальных значений. Если на этом этапе полета РН обечайка бака будет воспринимать вибрационное воздействие от двигателя с частотой порядка 2 кГц, тогда можно говорить о реализации неблагоприятной формы динамического нагружения металла в районе сварных швов бака по типу, представленному на рис. 1.

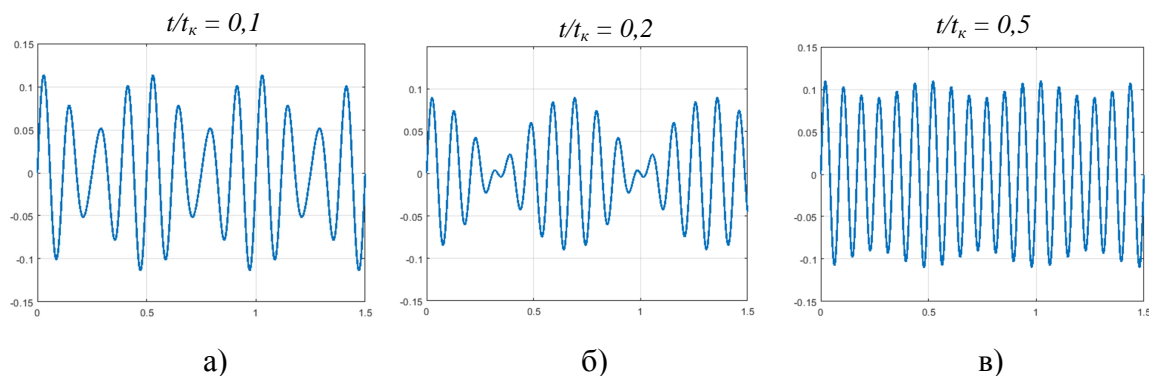


Рис. 7. Характер изменения во времени деформации от колебаний по первой и второй формам в обечайке бака горючего в различные моменты времени:
а – $t/t_k = 0,1$ (точка «А»); б – $t/t_k = 0,2$ (точка «В»); в – $t/t_k = 0,5$ (точка «С»)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современная технология сварки обечаек топливных баков трением с перемешиванием допускает наличие микротрещин в швах, которые могут подвергаться ускоренному развитию вплоть до разрушения баков в условиях сложного вибрационного нагружения в процессе полета РН. Численное моделирование продольных колебаний корпуса ракеты в полете позволило качественно выделить наиболее критичные сечения в обечайках баков первой ступени. С учетом специфики изменения деформаций в обечайках баков от действия колебаний на первых двух формах можно выделить бак горючего первой ступени как один из наиболее критичных элементов ракеты.

В качестве основных параметров вибрации, которые могут существенно ускорить развитие трещин в баке горючего, необходимо выделить амплитуды низкочастотных продольных колебаний на частоте второй формы собственных колебаний корпуса РН на заключительном этапе работы двигателя. Как дополнительный негативный фактор необходимо отметить средне- и высокочастотные механические колебания от вибрации агрегатов маршевого ЖРД. В баке горючего складываются такие неблагоприятные факторы, как максимум градиента формы колебаний, а также периодическая вынуждающая сила от пульсации тяги двигателя в хвостовой части РН.

Список используемых источников

1. Механические свойства металлов: в 2 ч. – М.: Машиностроение, 1974. – Ч. 2: Механические испытания. Конструкционная прочность. – 368 с.
2. Рабинович Б.И. Введение в динамику ракет-носителей космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 1975. – 416 с.
3. Натанзон М.С. Продольные автоколебания жидкостной ракеты. – М.: Машиностроение, 1977. – 208 с.
4. Султанов А.Э., Перфильев А.С., Герасименко С.Ю. Условия возникновения высокоамплитудных низкочастотных колебаний корпуса ракеты-носителя, снижающие надежность агрегатов двигательных установок // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – Вып. 7. – С. 391–400.

Е.А. Прокопенко,
кандидат техн. наук;
А.В. Шевченко,
кандидат техн. наук;
С.А. Яшков,
кандидат техн. наук

ВЕРИФИКАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СИЛЫ ЛОБОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ГИПЕРЗВУКОВОГО ПОТОКА, ДЕЙСТВУЮЩЕЙ НА ЭЛЕМЕНТЫ КОНСТРУКЦИИ ОБЪЕКТОВ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

В публикации представлен сравнительный анализ результатов численных расчетов, выполненных с использованием инструментария Ansys CFD, и экспериментальных исследований, выполненных в гиперзвуковой импульсной трубе ИТ-1М Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, коэффициента силы лобового сопротивления объекта ракетно-космической техники. В качестве объекта исследования выбран тонкий затупленный по сфере конус, представляющий собой модель головного обтекателя ракеты космического назначения. Результаты сравнительного анализа показали, что выбранная математическая модель гиперзвукового обтекания объекта исследования с высокой степенью достоверности согласуется с результатами экспериментальных исследований, что позволяет использовать ее в качестве базовой для численных расчетов аэродинамических характеристик элементов конструкции объектов ракетно-космической техники, движущихся на малых углах атаки.

Ключевые слова: аэродинамические характеристики, гиперзвуковое обтекание, ракетно-космическая техника, импульсная аэродинамическая труба.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие сложилась устойчивая тенденция к использованию компьютерных автоматизированных систем инженерных газодинамических расчетов для проектирования элементов конструкции ракетно-космической техники (РКТ). При разработке объектов ракетно-космической техники (до начала натурных летных испытаний) наиболее эффективным является разумное использование численных методов исследований в сочетании с экспериментальными, которые являются средством верификации результатов расчетов. Основными инструментами для изучения аэродинамических характеристик (АДХ) объектов РКТ в области гиперзвуковых скоростей полета в настоящее время остаются экспериментальные исследования в аэродинамических трубах, моделирующих условия натурального полета. Возрастающие требования к точности определения АДХ ракет космического назначения, напрямую влияющие на программу выведения полезного груза на целевую орбиту, ставят задачу совершенствования методов и средств исследования. Поэтому сопоставление результатов численных исследований с данными экспериментов имеет важное значение для правильного определения адекватности получаемых картин обтекания и влияет на точность получаемых результатов расчетов АДХ.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИПЕРЗВУКОВОГО ОБТЕКАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

В основу математической модели гиперзвукового обтекания элементов РКТ положена модель вязкого совершенного газа, описываемая уравнениями Навье – Стокса (1–4) [1, 2]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho V = 0, \\ \frac{\partial(\rho V)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V \otimes V + pE - T_v) = 0, \\ \frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot [(\rho E + p) \cdot V - T_v \cdot V + q] = 0, \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} p = R\rho T, \\ E = e + |V|^2 / 2, \\ e = c_v T, \end{cases} \quad (2)$$

$$T_v = \mu \cdot (\nabla \cdot V) \cdot G + \mu \cdot (\nabla \otimes V + \nabla \otimes V^T), \quad (3)$$

$$q = -\lambda \nabla T, \quad (4)$$

где ρ – плотность газа;
 p – давление газа;
 t – время протекания процесса;
 E – полная энергия газа;
 c_v – теплоемкость газа при постоянном объеме;
 T – температура газа;
 R – газовая постоянная;
 T_v – тензор вязких напряжений;
 G – метрический тензор;
 μ – коэффициент динамической вязкости газа;
 q – вектор потока тепла;
 λ – коэффициент теплопроводности газа;
 ∇ – векторный дифференциальный оператор (оператор Гамильтона).

На твердой непроницаемой поверхности обтекаемого тела к системе (1) присоединяется граничное условие прилипания:

$$V = 0. \quad (5)$$

На границе входа потока задаются следующие граничные условия:

$$\rho = \rho_\infty, \quad V = V_\infty, \quad T = T_\infty, \quad (6)$$

где $\rho_\infty, V_\infty, T_\infty$ – параметры невозмущенного потока.

На границе выхода потока из расчетной области задается одно условие:

$$V = V_\infty. \quad (7)$$

В качестве модели турбулентности, замыкающей уравнения Навье – Стокса, осредненные по Рейнольдсу, использовалась модель переноса сдвиговых напряжений Ментнера. Для решения системы уравнений желательно применять неявную схему на треугольной неструктурированной сетке, имеющей сгущение в областях с большими градиентами газодинамических параметров, так как это повышает вероятность сходимости невязок расчетной задачи.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНСТРУМЕНТАРИЯ ANSYS

Среди существующих математических методов моделирования физических процессов можно выделить следующие три, каждый из которых обладает своими достоинствами и недостатками:

1) аналитический:

– *преимущества*: простота и однозначная зависимость решения от исходных данных;
 – *недостатки*: в большинстве случаев не применим для моделей, описанных с помощью дифференциальных уравнений, особенно в частных производных;

2) полуаналитический (полуэмпирический):

– *преимущества*: простота, позволяет на качественном уровне оценить поведение функции;

– *недостатки*: узкая область применимости, невысокая точность расчетов;

3) численный:

– *преимущества*: позволяет получать с требуемой точностью решение задачи, описанной в виде дифференциальных уравнений, на заданном интервале значений;

– *недостатки*: требует специальной подготовки (знаний и умений).

С учетом выбранной математической модели гиперзвукового обтекания объектов РКТ, а также явным выбором численного метода в качестве метода решения задачи предложено в качестве инструмента расчета использовать функционал, реализованный в существующем программном обеспечении.

Для решения задач математического моделирования газодинамических процессов, возникающих при движении объектов РКТ ($M_\infty > 5$), существует большое количество функционального программного обеспечения, позволяющего получать в процессе расчетов газодинамические характеристики гиперзвукового потока. Однако большинство этих программ относятся к инструментальным и требует от оператора-исследователя специальных знаний численных методов математического моделирования и четкого представления протекающих физических процессов. Одним из мощных инструментов решения задач гидрогазодинамики, реализующих данные методы вычисления, является коммерческий программный комплекс Ansys Fluent (лицензия Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского № 1020993).

В качестве геометрической модели объекта ракетно-космической техники для проведения численных и экспериментальных исследований был выбран тонкий конус со сферическим носовым затуплением, являющийся геометрическим подобием головного обтекателя РКН. CAD модель исследуемого объекта для проведения численных расчетов в Ansys Fluent представлена на рис. 1.

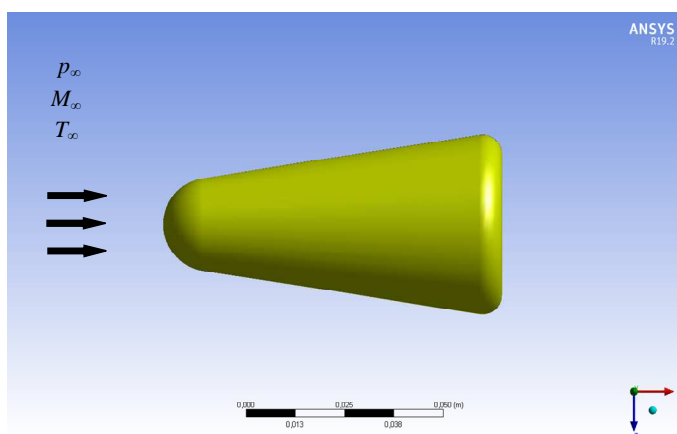


Рис. 1. CAD модель исследуемого объекта

Расчетная сетка имеет размерность $8,2 \cdot 10^4$ элементов (рис. 2). Расстояние от первой расчетной точки до стенки обеспечивало подходящий для используемой модели диапазон значений нормированного расстояния y^+ от 5 до 10 и являлось достаточно малым для определения местных газодинамических характеристик у поверхности тела [3].

Вследствие существенной неравномерности размеров ячеек сетки и жестких ограничений на шаг по времени, для ускорения процесса установления решения вычисления проводились с использованием индивидуального для каждой ячейки шага по времени.

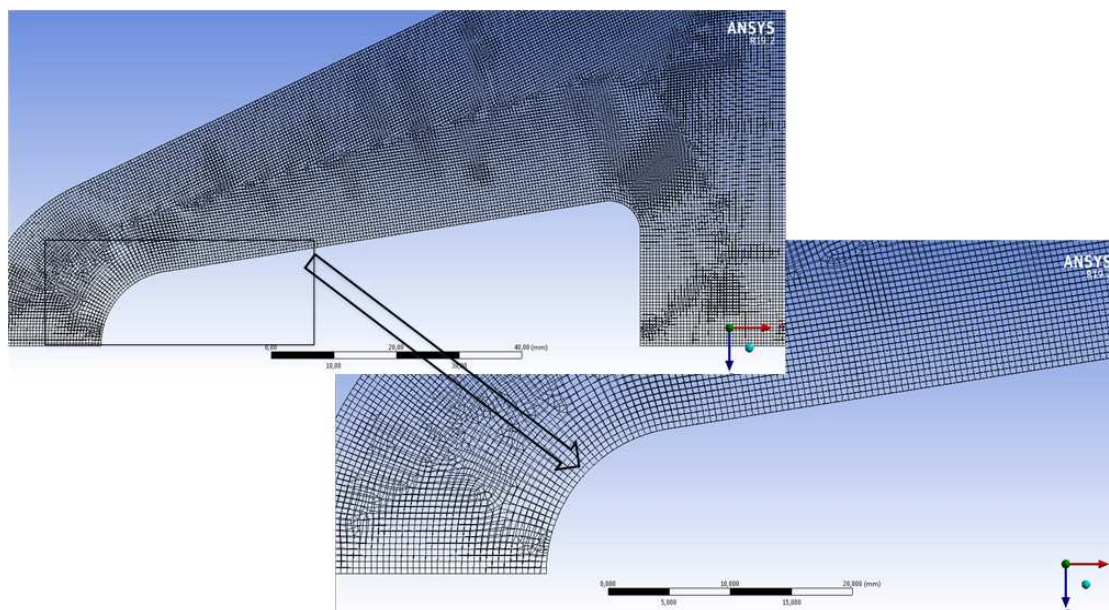


Рис. 2. Сетка конечных элементов расчетной области

Расчеты обтекания тела выполнены при следующих значениях параметров невозмущенного потока: $M_\infty=17$, $p_\infty=77,79$ кПа и $T_\infty=290$ К, что соответствует параметрам потока в импульсной аэродинамической трубе ИТ-1М. Результаты расчета распределения градиента давления и плотности, а также значения газодинамических параметров для выбранной модели объекта РКТ представлены в табл. 1 и на рис. 3.

Таблица 1

Значения газодинамических параметров, полученных расчетным путем

Физический параметр	Значение	Единица измерений
Число Маха потока	17	–
Деление торможения на модели	0,25	кгс/см ²
Сила лобового сопротивления (угол атаки $\alpha=0^\circ$)	8,7	Н
Коэффициент силы лобового сопротивления	0,263	–

ПОСТАНОВКА И ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА В ТРУБЕ ИТ-1М

Создание гиперзвуковых потоков в классических трубах требует больших энергетических мощностей, поэтому широкое применение для экспериментальных исследований в данной области находят импульсные аэродинамические трубы, в которых время существования квазистационарного течения в рабочей части составляет порядка 50–100 мс [4]. Импульсная гиперзвуковая аэродинамическая труба ИТ-1М аэродинамической лаборатории ВКА имени А.Ф. Можайского успешно используется в научных исследованиях для изучения обтекания моделей различных летательных аппаратов при числах $M_\infty=16$ –18. Отличием гиперзвуковых импульсных аэродинамических труб от классических установок является использование для разогрева газа высоковольтного электрического разряда в камере перед соплом.

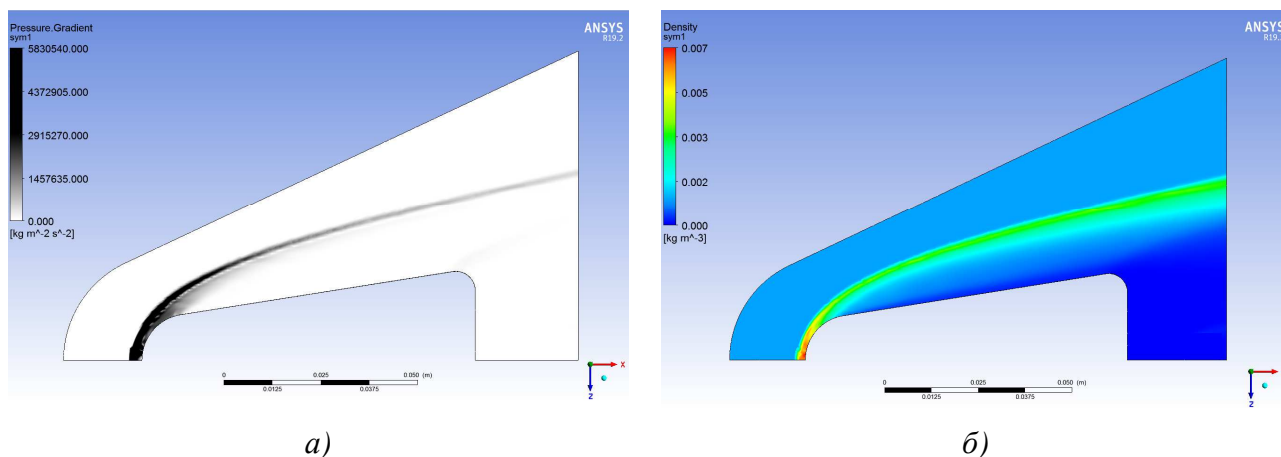


Рис. 3. Результаты расчета газодинамических параметров для выбранной модели объекта РКТ в Ansys Fluent:
 а – распределение градиента давления в потоке вдоль поверхности модели;
 б – распределение плотности потока вдоль поверхности модели

Инициализация электрической дуги осуществляется путем замыкания межэлектродного промежутка с помощью нихромовой проволоки. При этом температура в разрядной камере может достигать 3000 К, а давление – до 2000 бар. Несмотря на то, что в качестве рабочего газа используется чистый азот, в таких условиях возможно появление в потоке примесей как в виде частиц (продуктов эрозии электродов), так и в виде активных радикалов, появляющихся в результате диссоциации и ионизации компонентов. Однако эти явления, кажущиеся на первый взгляд негативными, позволяют с некоторой детализацией воспроизводить процессы, возникающие при реальном движении объектов РКТ, движущихся с гиперзвуковыми скоростями.

Импульсная гиперзвуковая аэродинамическая труба ИТ-1М имеет следующие технические характеристики [5]:

- рабочая часть цилиндрическая $\text{Ø}500 \times 500$ мм;
- сверхзвуковое сопло коническое, угол раствора $\theta=15^\circ$, диаметр критического сечения $d_{\text{кр}}=2$ мм, диаметр среза сопла $d_a=200$ мм;
- объем разрядной камеры $\Omega=100$ см³;
- рабочий газ – азот, начальное давление азота в камере перед пуском $p_n=90\text{--}150 \cdot 10^5$ Па;
- электрическая емкость батареи конденсаторов 5600 мкФ, напряжение 5000 В;
- начальное статическое давление в рабочей части перед пуском $p_\infty \approx 40\text{--}50$ Па;
- параметры в разрядной камере при пуске: давление $p_{01} \approx 1200 \cdot 10^5$ Па, температура $T_{01} \approx 2900$ К;
- давление торможения за прямым скачком уплотнения в критической точке на поверхности модели $p_{02} \approx 0,22 \cdot 10^5$ Па;
- продолжительность установившегося течения до $\tau \approx 20$ мс;
- реализуемое число Маха потока $M_\infty=16\text{--}18$.

Габаритный чертеж исследуемой модели, которая была выполнена из ABS пластика с использованием технологии 3D-печати, представлен на рис. 4. Параметры невозмущенного потока соответствуют движению РКН в верхних слоях атмосферы Земли.

Система измерения давления на поверхности моделей и силы лобового сопротивления реализована с помощью аппаратно-программного комплекса (АПК), включающего в свой состав:

- дифференциальные малогабаритные индуктивные датчики давления (ДМИ);
- тензометрический датчик давления в разрядной камере (ДДРК);

- трехкомпонентные тензометрические весы;
- преобразователь напряжений E14-440 компании L-Card;
- устройство сопряжения и аналоговой настройки датчиков;
- персональную электронно-вычислительную машину (ПЭВМ);
- программный комплекс, выполненный в среде графического программирования LabVIEW [6].

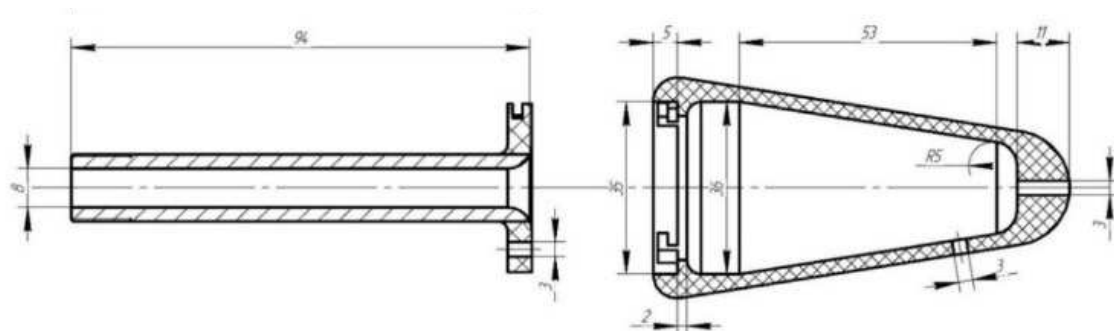


Рис. 4. Чертеж конуса со сферическим носовым затуплением

Измерение давления на поверхности модели производится датчиками ДМИ, которые предназначены для измерения мгновенных значений пульсаций давления нейтральных газов при аэродинамических испытаниях [7]. Эти датчики характеризуются малыми размерами, простотой установки в модели, а также относительно невысоким ценовым диапазоном. Схема размещения датчиков ДМИ в модели и их крепление на пилоне в рабочей части ИТ-1М представлены на рис. 5.

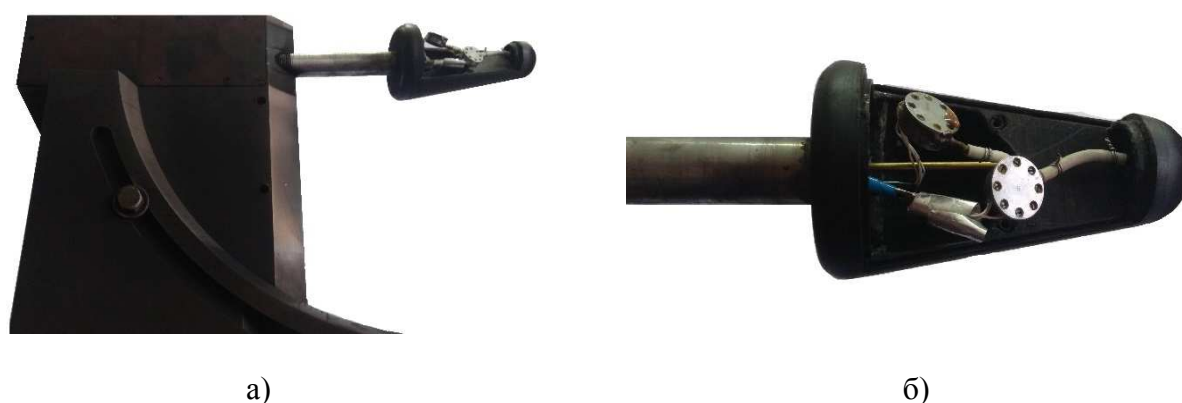


Рис. 5. Фотография крепления исследуемой модели объекта РКТ на пилоне (а) и размещение датчиков ДМИ внутри нее (б)

Для преобразования упругих деформаций чувствительных элементов, пропорциональных силам, действующим на модель, в электрические сигналы с последующей регистрацией в АПК используются трехкомпонентные аэродинамические весы [8, 9].

Тензометрические весы (рис. 6), позволяют измерять продольную X и нормальную Y составляющую аэродинамической силы и момента тангажа M_z .

В качестве чувствительных элементов используются:

- для измерения момента тангажа – балка M_z с двумя тензорезисторами, наклеенными на противоположные поверхности балки;
- для измерения нормальной силы – пара балок Y с двумя тензорезисторами;
- для измерения продольной силы – пара балок X с двумя тензорезисторами.

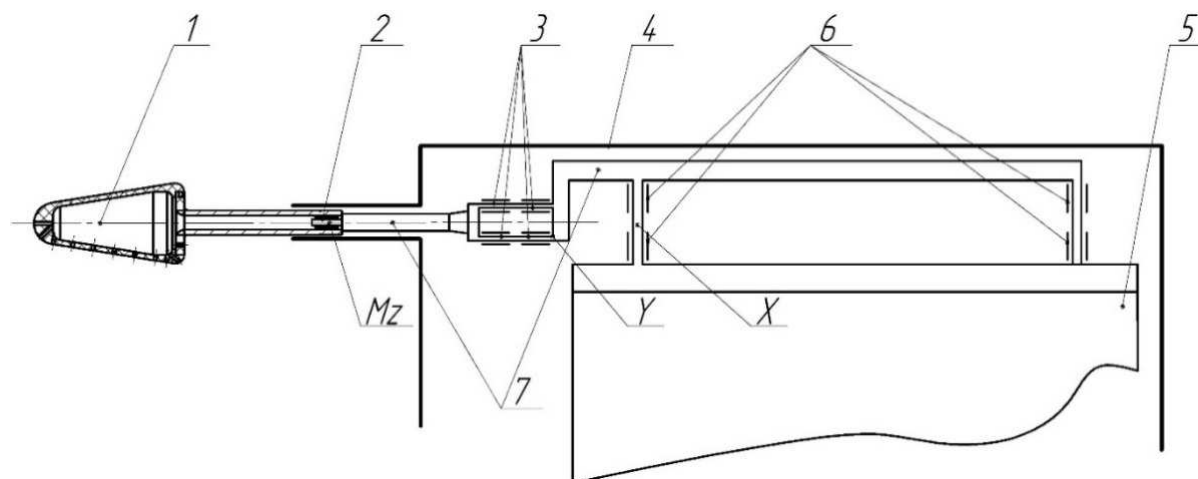


Рис. 6. Схема тензометрических весов:

1 – модель; 2 – тензодатчики момента тангажа; 3 – тензодатчики нормальной силы; 4 – обтекатель; 5 – державка (пилон); 6 – тензодатчики продольной силы; 7 – корпус весов

Полученные по результатам серии экспериментальных исследований осредненные значения газодинамических параметров и теневые картины представлены в табл. 2 и на рис. 7.

Для визуализации развития процесса производится видеосъемка картины гиперзвукового обтекания. Для этих целей применяется ширин-теневого прибор ИАБ-451 с лазерным и светодиодным осветителями (с длиной волны 535 нм) и цифровая видеокамера SONY RX100M4 с частотой съемки 1000 кадров/с и разрешением кадра 1244×420 пикселей. Время начала съемки синхронизировано со временем пуска ИТ-1М.

Таблица 2

Значения газодинамических параметров, полученных экспериментальным путем

Физический параметр	Значение	Единица измерений
Статическое давление	200	Па
Деление торможения на модели	0,25	кгс/см ²
Давление в разрядной камере (ГДД) до разряда	84	кгс/см ²
Давление в разрядной камере (ГДД) после разряда	918	кгс/см ²
Число Маха потока	17,1	–
Сила лобового сопротивления (угол атаки $\alpha=0^\circ$)	8,1	Н
Коэффициент силы лобового сопротивления	0,274	–

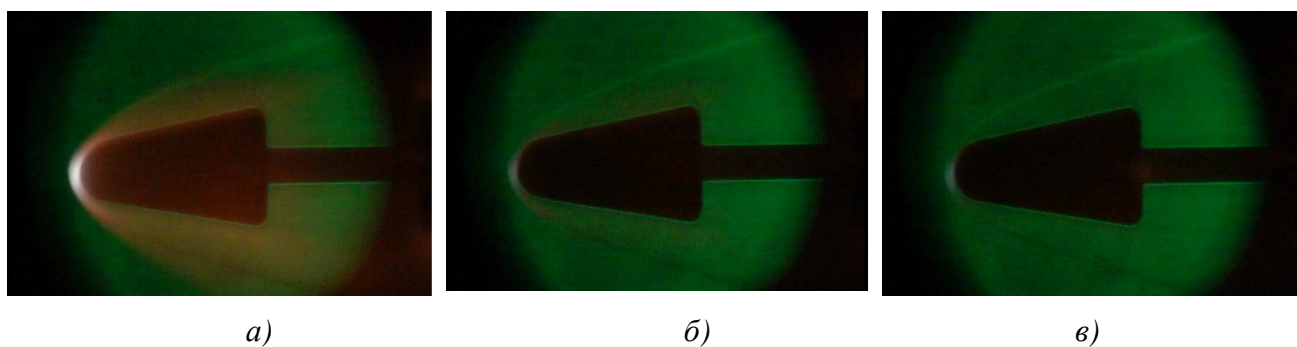


Рис. 7. Теневая фотография обтекания модели объекта РКТ:

а, б, в – установившийся режим гиперзвукового потока ($\tau = 33, 36, 39$ мс соответственно)

На данный момент отработана только технология измерения силы лобового сопротивления на малых углах атаки.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

При сопоставлении результатов экспериментальных и расчетных исследований обтекания модели объекта РКТ на гиперзвуковых скоростях были использованы критерии геометрического и динамического подобия (по числу Маха и Рейнольдса для невозмущенного потока), в качестве показателя адиабаты рабочего газа использовалось соответствующее значение для чистого азота.

Таким образом, в результате проведенного анализа результатов численного и экспериментального исследований коэффициента силы лобового сопротивления следует сделать вывод о том, что полученные данные с высокой степенью достоверности согласуются друг с другом (рис. 8 и табл. 3), в том числе и с данными, представленными в работах [10, 11].

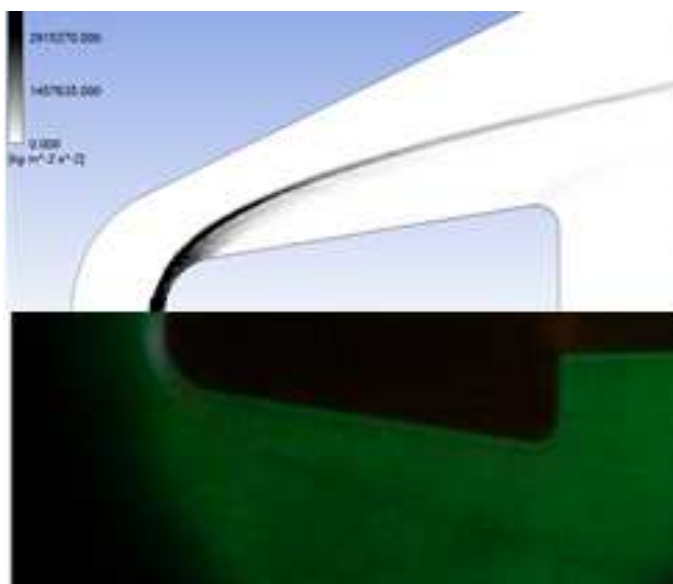


Рис. 8. Сравнение результатов математического моделирования (верх рисунка) с теневой фотографией, полученной в ходе экспериментального исследования обтекания модели объекта РКТ (нижняя часть рисунка)

Таблица 3

Значения газодинамических параметров, полученных экспериментальным и расчетным способами

Физический параметр	Значения эксперимента	Значения расчета	Единица измерений
Давление торможения потока газа	0,25	0,279	кгс/см ²
Число Маха потока	17,1	17	–
Сила лобового сопротивления	8,1	8,7	Н
Коэффициент силы лобового сопротивления	0,274	0,263	–

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе доказана возможность использования и доработки математического инструментария Ansys CFD применительно к задачам гиперзвуковой внешней аэродинамики при определении аэродинамических характеристик проектируемых объектов ракетно-космической техники. Выбранная методология численного моделирования гиперзвукового обтекания показала свою адекватность, а полученные численные результаты расчетов были верифицированы с данными экспериментальных исследований. При этом расхождения в значениях составили: для числа Маха $\Delta M \approx 0,6\%$; для коэффициента силы лобового сопротивления $\Delta c_x \approx 4\%$; для давления торможения $\Delta p_0 \approx 11,6\%$.

Полученные результаты не выражают принципиальную позицию авторов по использованию инструментария Ansys для расчета газодинамических характеристик, а только демонстрируют те возможности, которые имеются в руках инженера при проектировании внешнего облика объекта ракетно-космической техники, движущегося с гиперзвуковыми скоростями в атмосфере Земли.

Представленные результаты получены при финансовой поддержке программы научных исследований по гранту Президента Российской Федерации МК-654.2019.8.

Список используемых источников

1. *Галкин В.С., Русаков С.В.* О статусе уравнений Навье – Стокса в газодинамике (обзор) // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – М.: Изд-во РАН, 2018. – № 1. – С. 156–173.
2. CFD Simulations of Aerodynamic Flows with a Pressure-Based Method / F.R. Mentner, P.F. Galpin, T. Esch et. // Paper ICAS 2004–2.4.1. – Japan: Yokohama, 2004. – 11 p.
3. *Каплун А.Б.* Ansys в руках инженера. – М.: Едиториал УРСС, 2006 – 272 с.
4. *Звегинцев В.И.* Разработка, создание и использование газодинамических установок кратковременного действия для научных исследований: дис. ... д-ра техн. наук: 01.02.15: защищена 29.06.07: утв. 08.02.08. – Новосибирск, 2007. – 380 с.
5. *Прокопенко Е.А., Шевченко А.В., Яшков С.А.* Экспериментальная установка на основе импульсной аэродинамической трубы для определения газодинамических параметров потока вблизи гиперзвуковых летательных аппаратов // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 665. – С. 237–245.
6. Свид. 2018665819 Рос. Федерация. Программный измерительно-управляющий комплекс импульсной трубы ИТ-1М для определения газодинамических характеристик вблизи модели гиперзвукового летательного аппарата / Прокопенко Е.А., Яшков С.А.; заявитель и правообладатель Прокопенко Е.А, Яшков С.А. – № 2018663094; заявл. 20.11.2018; опубл. 11.12.2018, Бюл. № 12. – 1 с.
7. *Петунин А.Н.* Методы и техника измерений параметров газового потока (приемники давления и скоростного напора). – М.: Машиностроение, 1972. – 269 с.
8. *Харитонов А.М.* Техника и методы аэрофизического эксперимента. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – Ч. 2: Методы и средства аэрофизических измерений. – 456 с.
9. *Горлин С.М., Слезингер И.И.* Аэромеханические измерения. – М.: Наука, 1964. – 153 с.
10. *Красильщиков А.П., Гурьяшкин Л.П.* Экспериментальные исследования тел вращения в гиперзвуковых потоках. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 208 с.
11. *Лунев В.В.* Гиперзвуковая аэродинамика. – М.: Машиностроение, 1975. – 328 с.

В.В. Тришункин,
кандидат экономических наук
МО РФ, г. Москва

МОДЕЛЬ СОВМЕСТНОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВООРУЖЕНИЯ И СИСТЕМЫ ЗАКАЗОВ И ПОСТАВОК ТЕХНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛЬНЫХ СРЕДСТВ КОСМИЧЕСКИХ ВОЙСК

Рассмотрена функциональная модель совместного функционирования системы эксплуатации вооружения космических войск и системы заказов и поставок технических материальных средств (ТМС), описывающая взаимосвязь процессов заказа и поставки ТМС и основных функций системы эксплуатации (СЭ) вооружения космических войск (ВКВ). В предложенной модели выделены функции анализа качества совместного функционирования СЭ ВКВ и системы заказов и поставок (ЗиП) и внесения корректировок в механизмы управления как эксплуатационными, так и обеспечивающими процессами на основе определения показателей качества решения СЭ ВКВ целевых задач.

Ключевые слова: технические материальные средства, обеспечение готовности вооружения, функциональная модель.

ВВЕДЕНИЕ

Информационное обеспечение высшего военно-политического руководства, действий ВС РФ, коммуникационное обеспечение управления войсками и оружием, ведение боевых действий в космосе и из космоса являются важнейшими задачами, решаемыми космическими войсками на современном этапе. Эффективность выполнения задач во многом определяется не только качеством сложного и высокотехнологичного вооружения космических войск (ВКВ), заложенным на стадиях создания, но и способностью боевых расчетов в рамках существующей системы эксплуатации (СЭ) это качество поддерживать и реализовывать. Квалификация эксплуатирующего персонала, скорость доставки необходимого оборудования и комплектующих элементов, способность промышленности произвести их в нужном объеме и поставить в необходимые сроки – вот далеко не полный перечень факторов, определяющих уровень готовности ВКВ к применению по назначению.

Формирование организационно-технической системы, обеспечивающей эффективное решение задач ВКВ и представляющей собой совокупность взаимодействующих разнородных процессов и элементов – от номеров боевых расчетов до технологического оборудования, требует предварительного исследования и обоснования вариантов построения с помощью методов моделирования.

РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ МОДЕЛИ

Наиболее эффективным и хорошо зарекомендовавшим себя средством анализа и проектирования организационно-технических систем, обмена информацией между специалистами-аналитиками является методология SADT (Structured Analysis and Design Technique – методология структурного анализа и проектирования). Методы, являющиеся содержанием SADT, на начальных этапах создания системы позволяют гораздо лучше понять рассматриваемую проблему, и это сокращает затраты как на создание, так и на эксплуатацию системы, а кроме того, повышает ее надежность. Таким образом, SADT – это способ уменьшить количество дорогостоящих ошибок за счет структуризации системы на ранних этапах ее создания,

улучшения контактов между пользователями и разработчиками и сглаживания перехода от анализа к проектированию.

Полноценная реализация эксплуатационных процессов, начиная от подготовки эксплуатирующего персонала и заканчивая применением вооружения по назначению, невозможна без обеспечивающих процессов, важнейшими из которых являются процессы заказов и поставок технических материальных средств (ТМС) ВКВ. Под ТМС ВКВ в рамках данной работы будем понимать совокупность технических средств, предназначенных для поддержания ВКВ в исправном и готовом к применению по назначению состоянии, а также осуществления других эксплуатационных процессов. ТМС включают в себя технологическое оборудование, технические системы, системы электроснабжения, средства управления эксплуатацией вооружения и ЗИП.

Сложность, высокая стоимость, территориальная распределенность, а также ряд других факторов, которыми характеризуется ВКВ, и необходимость анализа процессов функционирования ВКВ с целью их совершенствования и повышения эффективности обуславливают необходимость применения специальных методов описания и анализа таких систем – методов моделирования. Описание таких организационно-технических систем, как СЭ ВКВ, является достаточно трудной задачей, для решения которой может быть использована хорошо зарекомендовавшая себя на практике методология ICAM Defenition (сокр. – IDEF) – интегрированная компьютеризация производства, специально разработанная для исследования и описания производственных и управленческих систем. Одна из составляющих этой методологии – IDEF0 применяется для создания функциональных моделей, отражающих структуру и функции системы, а также потоки информации и материальных объектов, преобразуемые этими функциями.

Модель в методологии IDEF0 – это совокупность иерархически упорядоченных и взаимосвязанных диаграмм. Основной концептуальный принцип IDEF0 состоит в представлении анализируемой системы в виде набора взаимосвязанных и взаимодействующих блоков. Этот набор отображает процессы, происходящие в анализируемой системе.

Как правило, функциональная модель в методологии IDEF0 содержит два типа диаграмм: контекстную диаграмму, которая представляет всю систему как один блок и показывает контекст системы, т. е. связь системы с внешним миром и диаграммы декомпозиции, которые получаются в результате выделения из контекстной диаграммы отдельных функций. Такой процесс называется функциональной декомпозицией, а диаграммы, получившиеся в результате декомпозиции, называются диаграммами декомпозиции. После декомпозиции контекстной диаграммы производится декомпозиция каждой получившейся диаграммы и т.д. В модели IDEF0 средства, используемые для выполнения функций, отображаются в виде стрелок, входящих в блоки модели снизу (так называемые «механизмы»), а управляющие воздействия, регламентирующие корректность выполнения моделируемой функции – в виде стрелок, входящих в блоки сверху [2].

Функциональные блоки на диаграммах декомпозиции расположены в порядке доминирования – по диагонали от левого верхнего угла к правому нижнему. Согласно этому принципу в левом верхнем углу находится самая важная функция или функция, выполнение которой должно предшествовать по времени выполнению остальных. Далее вправо вниз располагаются менее важные или реализуемые позже функции. Такое расположение облегчает чтение диаграмм, а также на нем основывается понятие взаимосвязей функций, выполняемых системой. Кроме того, в функциональных моделях используются различные виды обратных связей, например обратные связи по управлению или по входу.

Предлагаемая функциональная модель совместной работы систем ЗиП и СЭ ВКВ является универсальной с точки зрения типа эксплуатируемого ВКВ, однако вид рассматриваемых процессов и показателей качества их выполнения наиболее характерен для описания СЭ ракетно-космического комплекса (РКК), как одного из элементов ВКВ, предназначенного для решения или обеспечения решения задач освоения и использования космического простран-

ства. Основной функцией СЭ РКК является обеспечение пуска ракеты космического назначения (РКН) в установленное время, для чего решаются задачи подготовки эксплуатирующего персонала, ввода РКК и его составных частей в эксплуатацию, приведения элементов РКК в установленную готовность к использованию по назначению, содержания его в этой готовности и непосредственно – использования по назначению.

Выполнение указанных выше задач невозможно без эффективного функционирования системы ЗиП ТМС. Качество выполнения всех задач в рамках СЭ зависит от своевременности и полноты обеспечения ТМС, что обуславливает необходимость совместного исследования СЭ и системы ЗиП ТМС. Рассуждая подобным образом, можно условно считать функции, реализуемые СЭ РКК, «основными», а системой ЗиП – «обеспечивающими». Качество совместного функционирования СЭ и системы ЗиП ТМС ВКВ для РКК при таком подходе можно охарактеризовать с помощью показателей качества решения целевых задач СЭ РКК– вероятностью проведения пуска в установленное время и ресурсоемкостью процесса подготовки и пуска.

На рис. 1 представлена контекстная диаграмма функциональной модели системы технического обеспечения применения ВКВ, описывающая все основные связи моделируемой системы с внешней средой.



Рис. 1. Функциональная модель, отображающая связи системы применения ВКВ с внешней средой

Представленная на рис.1 функциональная модель системы применения ВКВ, в соответствии с выбранной методологией, описывает процесс выполнения КВ задач по назначению путем преобразования поступающих на вход системы материальных ресурсов и информации в результаты, описываемые показателями качества функционирования СЭ ВКВ и решения целевых задач.

Правила функционирования моделируемой системы регламентируются руководящими, нормативно-техническими и эксплуатационными документами, отображаемыми на диаграмме в виде управляющих стрелок. Персонал предприятий ОПК, системы ЗиП, НИО предприятий промышленности и личный состав органов военного управления различного уровня, решающий задачи обеспечения применения ВКВ по назначению, являются непосредственными исполнителями функции, соответствующей названию блока. Их взаимодействие с остальными составляющими процесса описывается стрелками, расположенными в нижней части диаграммы.

Представленная контекстная диаграмма в соответствии с методологией подлежит дальнейшей декомпозиции – разбиению основной выделенной функции на подфункции, то есть более детальному представлению.

Выделим в рамках системы применения ВКВ две основные подсистемы: подсистему заказов и поставок ТМС КВ, обеспечивающую процессы поддержания готовности, протекающие на стадии эксплуатации ВКВ, и систему эксплуатации ВКВ, в рамках которой непосредственно выполняются все необходимые процессы поддержания в готовности ВКВ и его применения. На рис. 2 представлена функциональная модель, содержащая подсистемы ЗиП и СЭ ВКВ.

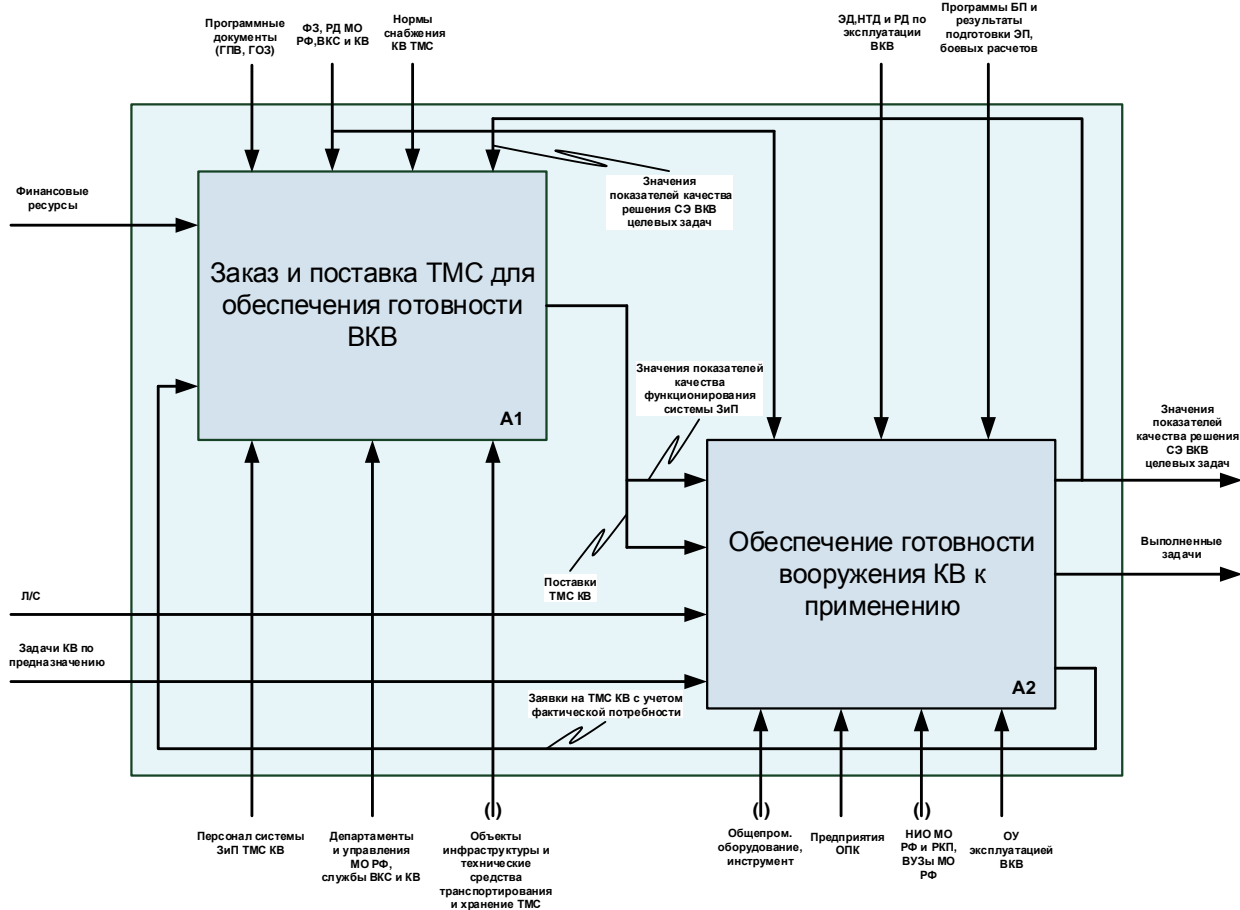


Рис. 2. Функциональная модель совместной работы системы ЗиП ТМС и СЭ ВКВ

На рис. 2 представлены обратные связи СЭ и системы ЗиП: по управлению – значения показателей качества решения СЭ ВКВ целевых задач (показатели результативности и ресурсоемкости процесса подготовки и пуска) используются для формирования управляющих воздействий на элементы системы ЗиП и по входу – данные о фактической потребности СЭ

ВКВ в ТМС используются для формирования необходимых объемов заказов и поставок совместно с требованиями программных документов и установленных норм расхода. Управляющие воздействия на систему ЗиП применяются для корректировки параметров имитационных моделей, описывающих функционирование цепочек поставок ТМС КВ в эксплуатирующие организации и позволяющих при необходимости обосновывать варианты управленческих решений, обеспечивающих требуемые значения целевых показателей СЭ ВКВ за счет изменения параметров системы ЗиП [2].

В процессе дальнейшей декомпозиции двух выделенных подсистем рассмотрим основные функции, механизмы их реализации и взаимосвязь со старшими уровнями иерархии модели. Функциональная модель системы ЗиП ТМС КВ, изображенная на рис. 3, представляет собой схему функционального взаимодействия двух подсистем: подсистемы обеспечения заказов ТМС и подсистемы обеспечения поставок ТМС.

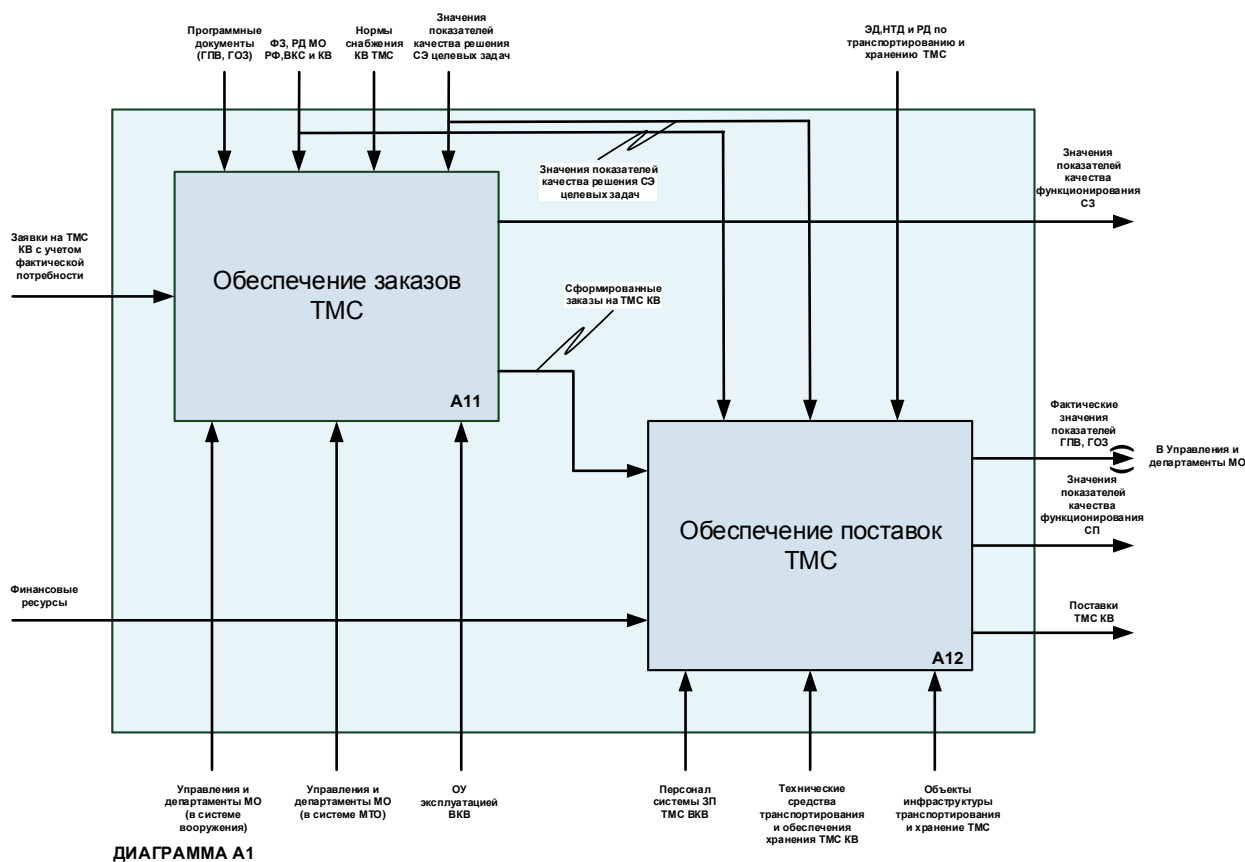


Рис. 3. Функциональная модель совместной работы подсистем обеспечения заказов ТМС и обеспечения поставок ТМС

В представленной модели выходные значения параметров ГПВ и ГОЗ, оцениваемые по результатам заказа и поставки ТМС, далее направляются и используются за рамками системы применения ВКВ – в органы военного управления, ответственные за формирование и исполнение ГПВ. К таким органам в МО РФ относятся Главное управление вооружения ВС РФ, департамент МО РФ по обеспечению государственного оборонного заказа (ДОГОЗ), департамент государственных закупок МО РФ и департамент аудита госконтрактов МО РФ. Значения показателей качества функционирования подсистемы заказов и подсистемы поставок направляются на стадию эксплуатации, где и происходит их оценивание. Для описания качества функционирования подсистемы заказов используем показатели эксплуатационно-технических характеристик и стоимости владения ВКВ, характеризующие выбранного поставщика ВКВ и, следовательно, описывающие эффективность функционирования системы

заказов – единичные и комплексные показатели надежности, показатели эксплуатационной технологичности и контролепригодности в соответствии с [1], удельные суммарные затраты на техническое обслуживание и ремонт и коэффициент эксплуатационно-экономической эффективности, характеризующий отношение выбранного показателя готовности ВКВ к величине суммарных затрат на его обеспечение.

Основной задачей СЭ ВКВ является обеспечение применения ВКВ по назначению в установленное время и в любых условиях обстановки, что предполагает последовательное решение ряда подзадач, оценивание качества решения этих подзадач при помощи интегральных показателей, зависящих в общем случае не только от параметров СЭ. Функциональная модель СЭ ВКВ представлена на рис. 4.

В соответствии с положениями руководящих документов по эксплуатации ВКВ ключевыми задачами, решаемыми СЭ ВКВ, являются поддержание ВКВ в постоянной готовности к использованию (применению по назначению), его применение по назначению и подготовка личного состава к эксплуатации ВКВ.

В приведенной на рис. 4 модели эти задачи, в соответствии с методологией IDEF0, изображены в виде функциональных блоков таким образом, что блоки, расположенные на диаграмме выше и левее, «доминируют» над блоками, расположенными ниже и правее. «Доминирование» понимается как влияние, которое один блок оказывает на другие блоки диаграммы и очередность решения задач эксплуатации [3]. Так, например, задача «Подготовка личного состава БР (эксплуатирующего персонала) ВКВ» в приведенной модели рассматривается как первоочередная и обеспечивающая решение остальных задач эксплуатации. Действительно, в практике эксплуатации ВКВ все остальные задачи решаются силами эксплуатирующего персонала в составе БР или дежурных смен, а квалификация персонала оказывает непосредственное влияние на показатели качества решения целевых задач, например на вероятность проведения пуска ракеты космического назначения в установленное время. В модели подготовленный эксплуатирующий персонал на последующих этапах эксплуатации отображается, участвует в решении задач эксплуатации в качестве «механизма», совместно с представителями органов управления эксплуатацией, представителями предприятий оборонно-промышленного комплекса (ОПК) и технологическим оборудованием и инструментом. Отметим, что в качестве «механизма» подготовки персонала предусмотрено использование учебно-тренировочных средств, чье положительное влияние на качество и оперативность его обучения доказано практикой. Отдельное внимание при определении тактико-технических требований к УТС в рамках системы заказов необходимо уделить, кроме их содержания, структуре и алгоритму изучения учебно-методических материалов, а также рациональному распределению времени на теоретическое обучение и практическую подготовку.

Самым нижним блоком разработанной модели является блок, реализующий задачу анализа качества функционирования СЭ ВКВ. Функция анализа качества функционирования СЭ, формирования показателей и использования их в контуре обратной связи системы управления ЗиП и эксплуатацией ВКВ является, на наш взгляд, важнейшей для обеспечения эффективного и устойчивого функционирования системы применения ВКВ.

Результаты сравнения значений комплексных показателей надежности технологического оборудования, показателей ресурсоемкости и результативности решения задач СЭ с требованиями, установленными в тактико-технических заданиях на ВКВ и руководящих документах, позволяют обоснованно вносить корректирующие воздействия в процессы функционирования системы ЗиП и СЭ ВКВ в виде рекомендаций по их совершенствованию. В представленной на рис. 4 функциональной модели СЭ ВКВ этот подход реализован в виде обратных связей блока А25 с блоками А11, А12 и А21-А24 по управлению.

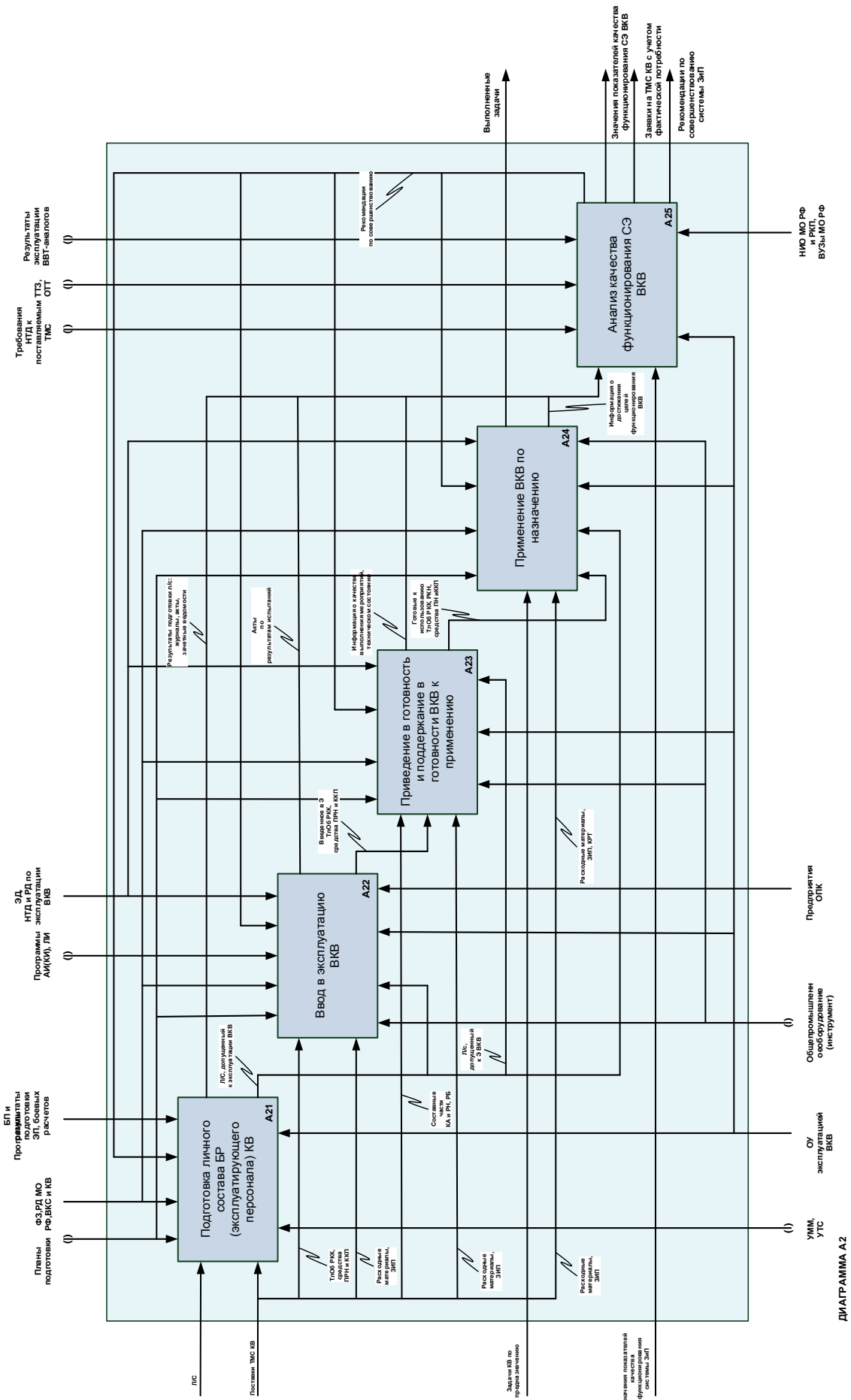


Рис. 4. Функциональная модель работы СЭ ВКВ

ДИАГРАММА А2

Ряд выходных параметров моделей, представленных на рис. 3 и 4, таких как «Фактические значения показателей ГПВ (ГОЗ)», «Выполненные задачи» и «Рекомендации по совершенствованию системы ЗиП», используются за рамками рассматриваемой модели в виде входной информации для департаментов и управлений МО РФ, участвующих в формировании ГПВ, федеральных органов исполнительной власти и системе управления оборонно-промышленным комплексом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отметим, что задача анализа качества функционирования СЭ ВКВ сформулирована в существующих руководящих документах по организации эксплуатации ВКВ и предполагает сбор и анализ данных о функционировании ВКВ, его проектных, конструктивных и технологических дефектах, разработку предложений по совершенствованию вооружения и его эксплуатации. Решение этой задачи в современных условиях требует широкого внедрения в практику эксплуатации ВКВ автоматизированных систем управления эксплуатацией (АСУЭ), позволяющих осуществлять сбор, систематизацию, накопление и анализ данных о эксплуатируемом ВКВ, его техническом состоянии и динамике изменения в течение всего срока эксплуатации, выполняемых эксплуатационных процессах. Наличие в составе таких АСУЭ полимодельных комплексов, позволяющих проводить анализ сложившейся организационно-технической системы с точек зрения «как есть» и «как должно быть», обосновывать направления реинжиниринга технологий текущей и перспективной деятельности организации на основе контроля и прогнозирования изменения основных показателей качества ВКВ и СЭ, существенно повысит эффективность решения ВКВ задач по предназначению.

Список используемых источников

1. ГОСТ Р 56111–2014. Интегрированная логистическая поддержка экспортируемой продукции военного назначения. Номенклатура показателей эксплуатационно-технических характеристик. – М.: Стандартинформ, 2014. – 29 с.
2. Р 50.1028-2001. Рекомендации по стандартизации. Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Методология функционального моделирования. – М.: Стандартинформ, 2014. – 78 с.
3. Горбаченко В.И., Убиенных Г.Ф., Бобрышева Г.В. Создание функциональной модели информационной системы с помощью CASE-средства CA ERwin Process Modeler 7.3. – Пенза: ПГУ, 2010. – 66 с.
4. Замятина О.М. Моделирование систем: учеб. пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 204 с.

С.А. Багрецов,
доктор техн. наук, доктор экономических наук, профессор;
Т.Э. Черная

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕОБХОДИМЫХ УСЛОВИЙ ИЗМЕНЕНИЯ СТРАТЕГИЙ ОБУЧЕНИЯ (ТОЧЕК ТРАНСФОРМАЦИИ) ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ПРИНЦИПОВ ТРАНСФОРМАЦИОННОЙ ТЕОРИИ ОБУЧЕНИЯ

В основу методики положена модель изучения практических дисциплин, связанных с процессами приобретения обучающимися знаний, умений и навыков (ЗУН) управления сложными объектами и процессами, составляющими основу их будущей профессиональной деятельности. Рассматривается полиструктурный, трансформационный процесс обучения, представляемый в виде совокупности взаимно переходящих друг в друга этапов (стратегий) формирования ЗУН. В рамках этой модели представлена методика определения статистических пороговых условий (трансформационных точек) перехода от одной стратегии обучения к другой. Задача реализуется на основе построения нелинейной регрессионной зависимости разности между достигнутым и предельным уровнями обученности от номеров циклов контроля знаний обучаемых. На основе оценок стандартных ошибок параметров регрессии по критерию Стьюдента вычисляются интервальные значения регрессии. Точка трансформации определяется на основе применения оптимальных правил принятия решения Вальда в условиях независимых статистических оценок существенности значимости разности между достигнутым и предельным уровнями обученности ее пороговому значению.

Ключевые слова: модели обучения, трансформационный процесс обучения, точки трансформации, нелинейная регрессия, стандартные ошибки параметров регрессии, коэффициенты Фишера, Стьюдента, интервалы регрессии, критерий Вальда.

Исследования когнитивных процессов формирования ЗУН управления современными человеко-машинными комплексами и сложными технологическими процессами, выполненные в работах [1–4], в том числе и авторами этой статьи, убедительно показали, что процесс обучения носит не монотонный, а нелинейный полиструктурный характер и представляется сложной взаимосвязанной динамикой эволюции и трансформации стратегий, применяемых в процессе обучения. Переход от одной стратегии z к другой может быть обусловлен либо преднамеренным (осознанным) снижением сложности выполнения заданий обучаемыми за счет, например, их большей специализации на вышестоящем уровне управления объектом (познания сущности изучаемых явлений и т.п.), либо, наоборот, за счет увеличения сложности их решения на основе возрастания объема и значимости используемой информации. Внутреннее содержание таких трансформационных изменений процесса обучения определяется частными особенностями изучаемого материала, внутренним содержанием целевых задач формирования ЗУН в конкретно рассматриваемой сфере деятельности специалистов, а также способами его актуализации, в том числе, например, за счет изменения мотивационной направленности, повышения адекватности восприятия целевых задач обучения и т.д. При этом процесс обучения может описываться традиционными монотонными моделями [1, 3, 4] лишь в частных случаях, на этапах и в периоды применения конкретных стратегий обучения, являющихся актуальными на данный момент времени.

Вместе с тем, принимая трансформационную теорию обучения в качестве базовой, необходимо обозначить и решить ряд проблемных задач ее реализации на практике, а именно: первой и наиболее важной является задача определения момента (номера занятия, цикла контроля знаний и т.п.) перехода от одной стратегии изучения материала к другой (т.е. определения точек трансформации), вторая задача связана с оптимальным выбором самих стратегий обучения, обеспечивающих дальнейшее повышение эффективности когнитивного процесса познания методов и приемов управления изучаемым объектом или реализуемым

технологическим процессом [1, 3]. В первом случае необходимо определить такую трансформационную точку (т.е. число периодов, циклов обучения, числа занятий и т.п.), ниже которой переход на новую стратегию приведет к значительному спаду эффективности процесса обучения, вследствие, в первую очередь, неготовности специалиста к восприятию новой стратегии (нового способа решения задач, анализа информации и т.д.), а выше которой усвоенные ранее навыки и умения решения стандартных для данного этапа обучения задач приобретают консервативную форму и становятся тормозом в восприятии нового [1, 10]. В ряде случаев такой процесс перестройки мышления во многом определяется сложностями психологического порядка, а именно, сложностями структурного изменения способов восприятия информации, методов ее переработки и т.д. [1, 8, 9, 10, 11].

В данной публикации мы подробно рассмотрим методику решения только лишь первой задачи. Задачи второго направления будут рассмотрены авторами в последующих статьях этого цикла.

Далее будем рассматривать модель процесса обучения на одном из его участков, предусматривающих применение одной из стратегий обучения. Для описания процесса обучения, принимая в этом случае его моноструктурный характер, может быть использован широкий спектр моделей [2, 4, 5]. Как правило, они носят существенно нелинейный характер и в подавляющем большинстве случаев описываются показательными, степенными, экспоненциальными или логистическими функциями. В данном случае выбор вида модели для решения поставленной задачи не играет существенной роли. Так, в работе авторов [5] рассматривается наиболее распространенная экспоненциальная модель обучения следующего вида

$$Q(z, x) = Q_{\text{пред}}(z) - a \left(Q_{\text{пред}}(z) \right) * e^{-\lambda(z)x}; \quad (1)$$

$$a \left(Q_{\text{пред}}(z) \right) = Q_{\text{пред}}(z) - Q_{\text{нач}}(z),$$

где $Q_{\text{пред}}(z)$ – предельное значение уровня обученности для данного обучаемого при применении z -й стратегии решения ТС задач;

$a \left(Q_{\text{пред}}(z) \right)$ – искомый коэффициент модели, зависящей от $Q_{\text{пред}}(z)$;

$Q_{\text{нач}}(z)$ – начальный уровень обученности;

$\lambda(z)$ – интенсивность обучения;

x – время обучения (как правило, представляемое в виде числа проведенных занятий или циклов контроля знаний).

Несмотря на существенные различия перечисленных выше моделей, общим их параметром, обязательно подлежащим определению, является параметр предельного уровня обученности. Он, по мнению Дружинина [11], для каждой задачи (комплекса задач в изучаемой теме) определяет свой объем когнитивного ресурса, необходимого для ее успешного решения. В свою очередь, как это было указано в предыдущей работе авторов [14], когнитивный ресурс предопределяет и выбор стратегии индивида при решении задач с учетом его индивидуальных способностей, а именно: от упрощения задачи при недостатке когнитивного ресурса до сложных альтернативных форм мышления при свободном оперировании избыточными ресурсами. Вместе с тем ресурс – это не только ограничения, но и возможности, предоставляемые субъекту средствами среды обучения для эффективного приобретения опыта на основе применения новых стратегий обучения.

Таким образом, когнитивный ресурс динамичен, он отражает динамику внутреннего восприятия учебного материала обучаемым, а его объем не статичен, как это декларируется в существующих моделях обучения, а подвержен постоянным изменениям по мере освоения учебного материала и внутреннего осознания его значимости. Из этого вывода следует, кстати, еще одно важное замечание, связанное со значимостью личностных характеристик обучаемого и его мотивационной направленностью на учебную деятельность. В данном случае мы рассматриваем действие этих факторов в локальной сфере учебной деятельности при

изучении конкретной темы конкретного изучаемого предмета. Однако становится понятным, что вопросы трансформационных изменений процесса обучения могут быть связаны не только с изменениями методических подходов к процессу обучения, с агрегированием или расширением информационного материала, но и с изменениями психологической, мотивационной направленности обучаемых на изучение данного учебного материала.

С учетом приведенного выше анализа становится понятной важность правильной, минимизирующей субъективизм, оценки этого параметра для адекватного отражения процесса обучения на основе применения математических моделей. Доминирующий в решении этой задачи субъективный подход отражал только лишь субъективные представления эксперта о когнитивных возможностях обучаемых безотносительно к динамике их изменения. В работе [14] авторами предложена методика оценки предельного уровня обученности $Q_{\text{пред}}(z, x)$ на основе применения итерационной процедуры оптимизации модели обучения по отношению к результатам текущего контроля ЗУН с учетом ретроспективы их изменений на данном этапе учебной деятельности.

Приближение уровня обученности индивида к его предельному значению [т.е. $\Delta Q = (Q(z, x) - Q_{\text{пред}}(z, x))$] свидетельствует об исчерпании его когнитивных ресурсов на данном этапе обучения в отношении определения методов и способов решения данного цикла изучаемых задач. Эта ситуация свидетельствует о необходимости перехода на новую стратегию познания учебного материала. Количественно этой ситуации соответствует пороговое значение $\Delta Q \leq 0,3$. Такое декларируемое значение необходимых условий (точек трансформации) изменения стратегий обучения, высказанное в работах [1, 11, 14], основано на логическом анализе и эмпирических исследованиях процесса обучения индивидов в различных областях и сферах знаний. Однако факт достижения этого порога в указанных работах не имеет под собой статистического обоснования с позиций строго математического анализа. Принимая во внимание [5, 10] доминирующий в целом способ аппроксимации кривых обучения экспоненциальными или логистическими функциями, следует с достаточной степенью уверенности утверждать, что регрессионная аппроксимация разности: $Y(z, x) = \{ (Q(z, x_i) - Q_{\text{пред}}(z, x_i)) : i=1, n \}$ может быть представлена экспонентой следующего вида: $\hat{Y}(x) = a e^{bx+\varepsilon}$. Здесь a, b – параметры аппроксимирующей нелинейной регрессии; $x = \{x_i : i = 1, n\}$ – текущие значения объясняющей переменной (например, число занятий, время, количество циклов контроля знаний и т.п.); ε – случайная ошибка аппроксимации, мультипликативно связанная с объясняющей переменной. Для упрощения написания формул индекс z , определяющий типологические особенности стратегии обучения, далее будем опускать.

Для определения параметров регрессии используем известные методы линеаризации регрессии: $\ln \hat{Y}(x) = \ln a + bx + \varepsilon$. Параметры регрессии в отношении логарифмов параметров регрессии, таким образом, могут быть определены методом наименьших квадратов путем решения задачи минимизации функции вида:

$$\sum_{i=1}^n (\ln y_i(x_i) - \ln \widehat{y_i(x_i)})^2 \rightarrow \min_{ab}, \quad (2)$$

где $\ln y_i(x_i)$ – логарифмы наблюдаемых значений разностей:

$$y_i(x_i) = (Q(x_i) - Q_{\text{пред}}(x_i)); \ln \hat{Y}(x) = \ln a + bx + \varepsilon; x = \{x_i : i = 1, n\}.$$

Решая задачу (2), получим: $b = (\ln Y(x) \cdot x + \bar{x} \ln Y(x)) / 6_x^2$, где 6_x^2 – дисперсия объясняющей переменной x , $6_x^2 = \overline{x^2} - (\bar{x})^2$; $\ln Y(x) \cdot x = (\sum_{i=1}^n \ln y_i(x_i) \cdot x_i) / n$; $\ln Y(x) = (\sum_{i=1}^n \ln y_i(x_i)) / n$; $\bar{x} = (\sum_{i=1}^n x_i) / n$.

Исходя из условия линейности логарифмируемой регрессионной зависимости, получим: $\ln a = \ln Y(x) - b \bar{x}$. Линейный коэффициент корреляции для линейного уравнения $\ln \hat{Y} = \ln a + b x$ будет иметь вид $r_{\ln \hat{Y}}^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\ln y_i(x_i) - \ln \widehat{y_i(x_i)})^2}{\sum_{i=1}^n (\ln y_i(x_i) - \ln \widehat{y_i(x_i)})^2}$.

Стандартная ошибка регрессии с учетом ошибок ее параметров в этом случае может быть записана следующим образом [7]:

$$m_{\ln \widehat{Y}(x)} = m_{\ln \widehat{Y}(s,x)} + m_b (x^* - \bar{x}), \quad (3)$$

где $m_b = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\ln y_i(x_i) - \ln \widehat{y}_i(x_i))^2 / (n-2)}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}} = s \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}$,

s – остаточное среднеквадратическое отклонение наблюдаемого процесса от значений его регрессионной модели,

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\ln y_i(x_i) - \ln \widehat{y}_i(x_i))^2}{n-2};$$

$$m_{\ln \widehat{Y}(x)} = \frac{1}{\ln a + b \bar{x}}.$$

Тогда с учетом случайной ошибки фактических значений наблюдаемых отклонений разности $\ln \Delta Q(x)$ стандартная ошибка регрессии $m_{\ln \widehat{Y}(x)}$ будет определяться выражением:

$$m_{\ln \widehat{Y}(x)} = s \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(x^* - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}, \quad (4)$$

где x^* – прогнозное значение объясняющей переменной регрессии логарифмов разностей $\Delta Q(x)$.

Переходя от логарифмических значений остаточных среднеквадратических отклонений s стандартной ошибки регрессии к их истинным значениям, получим [7]:

$$m_{y(x^*)} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i(x_i) - \text{anti log } \ln \widehat{y}_i(x_i))}{n-2} \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(x^* - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}. \quad (5)$$

Аналогично, индекс корреляции для полученного уравнения регрессии будет иметь вид:

$$\rho_{yx} = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i(x_i) - \text{anti log } \ln \widehat{y}_i(x_i))^2}{\sum_{i=1}^n (y_i(x_i) - y(x_i))^2}}.$$

Оценка существенности уравнения регрессии в целом осуществляется на основе расчета коэффициента Фишера:

$$F = \frac{\rho_{yx}^2}{1 - \rho_{yx}^2} (n - 2),$$

где ρ_{yx}^2 – коэффициент детерминации.

Как известно [7], для статистически достоверного уравнения регрессии с точки зрения соотношения дисперсионных отношений фактических и случайных (остаточных) отклонений должно выполняться неравенство: $F \geq F_{\alpha, (n-2)}$, где α – допустимая ошибка регрессии; $(n - 2)$ – степени свободы. Стандартная ошибка регрессии позволяет определить интервал ее допустимых изменений. Тогда с учетом интервальных изменений получим следующее выражение:

$$\widehat{Y}(x^*)^* = \widehat{Y}(x^*) \mp t_{\alpha, (n-2)} m_{y(x^*)}, \quad (6)$$

где $t_{\alpha, (n-2)}$ – критерий Стьюдента.

С учетом (5), (6) возможна оценка существенности отличий наблюдаемых разностей $y_i(x_i)$ от их прогнозируемых значений $\widehat{Y}(x^*)$. Для этого рассчитывается коэффициент Стьюдента:

$$t(x^*, x_i) = [y_i(x_i) - \widehat{Y}(x^*)] / m_{y(x^*)}, \quad (7)$$

При $t(x^*, x_i) \geq t_{\alpha, (n-2)}$ отклонение наблюдаемой разности статистически значимо. В противном случае различие признается незначимым. Будем рассматривать в качестве $\widehat{Y}(x^*)$ его пороговое значение разности между текущим уровнем обученности индивида и его предельным значением, т.е. $\widehat{Y}(x^*) = 0,3$, где, принимая во внимание вид регрессионного уравнения, $x = (\ln 0,3 - \ln a) / b$. Тогда при условии достоверности параметров регрессии и уравнения регрессии в целом оценки $t(x^*, x_i)$ по мере их накопления обеспечат сбор и обработку необ-

ходимой статистической информации для принятия решения о возможности перехода на новую стратегию обучения.

Рассматривая процесс принятия решения как отдельный акт статистического анализа, базирующийся на оптимальных правилах принятия решений в условиях независимых оценок $y_i(x_i) = Q(x_i) - Q_{\text{пред}}(x_i)$, в качестве его основы будем рассматривать метод последовательного анализа Вальда [5, 6], который базируется на оптимальных правилах принятия решения в условиях независимых оценок (испытаний):

$$y_j(x_j) = Q(x_j) - Q_{\text{пред}}(x_j),$$

где индексами $j = 1, k$ обозначена последовательность номеров контролей ЗУН обучаемых, принимаемых в качестве независимых оценок принятия решений об изменении стратегий обучения. Под испытанием в данном случае будем понимать реакцию оценок $y_j(x_j)$ при очередном увеличении цикла контроля знаний обучаемого в области $\Delta Q = \hat{Y}(x^*) = 0,3$. Каждое отдельное j -е испытание обозначим двоичной переменной $q_j = \{1, 0\}$, где $q_j = 1$ определяет положительный исход j -го испытания, т.е. полученные оценки $y_j(x_j)$ меньше или являются не существенными по отношению к пороговому значению разности $\Delta Q = \hat{Y}(x^*) = 0,3$; $q_j = 0$ определяет отрицательный в этом отношении исход j -го испытания. Формально правила формирования оценок q_j можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned} q_j = 1, \text{ при } \{((y_j(x_j) - 0,3) \leq 0 \vee (y_j(x_j) - 0,3) > 0) \wedge (t(x^*, x_i) \leq t_{\alpha, (n-2)})\}; \\ q_j = 0, \text{ при } \{(y_j(x_j) - 0,3) > 0 \wedge t(x^*, x_i) > t_{\alpha, (n-2)}\}. \end{aligned} \quad (8)$$

Каждому положительному или отрицательному j -му исходу испытания соответствуют веса $\Delta W_j(1)$ и $\Delta W_j(0)$ соответственно. Результаты оценок суммируются (при этом учитывается, что $\Delta W_j(0)$ отрицательны). В соответствии с методологией последовательного анализа Вальда [5, 6] полученные суммы на каждом j -м шаге контроля сравниваются с верхним и нижним порогами $\Pi_{\text{в}}$ и $\Pi_{\text{н}}$. Если накопленная сумма превышает верхний порог $\Pi_{\text{в}}$, то принимается решение о достижении точки трансформации, т.е. о необходимости перехода на новую стратегию обучения. Если накопленная сумма ниже $\Pi_{\text{н}}$ и меньше $\Pi_{\text{в}}$, но больше $\Pi_{\text{н}}$, контроль знаний обучающегося должен быть продолжен, а следовательно, принимается решение о продолжении обучения на основе принятой ранее стратегии. Для определения порогов рассматривается два вида рисков, а именно: α – риск неправильной оценки результатов j -го контроля знаний обучающегося; β – риск неправильного вывода о достижении порогового уровня разности $y_j(x_j) = 0,3$. Тогда верхние и нижние пороги принятия решения будут иметь вид:

$$\Pi_{\text{в}} = \frac{\alpha}{1-\beta}, \quad \Pi_{\text{н}} = \frac{\alpha}{1-\beta}. \quad (9)$$

Принимая во внимание справедливость условий независимости контролей знаний обучающегося на этапе изучения данного цикла дисциплин, предполагающий моноструктурный характер их изучения, алгоритм накопления весов оценок $y_j(x_j)$ с последующим их сравнением с порогами принятия решений можно представить в виде:

$$\frac{\alpha}{1-\beta} \leq \prod_{j=1}^k [l^{q_j} (q_j = 1) l^{q_j} (q_j = 0)] \leq \frac{1-\alpha}{\beta}, \quad (10)$$

В (10) k обозначено количество независимых испытаний (циклов контроля знаний); $l^{q_j} (q_j = 1)$, $l^{q_j} (q_j = 0)$ – отношения правдоподобия;

$$l^{q_j} (q_j = 1) = P_i(H_1/1) / P_i(H_0/1);$$

$$l^{q_j} (q_j = 0) = P_i(H_1/0) / P_i(H_0/0),$$

где H_1

– гипотеза о достижении порогового уровня разности

$$y_j(x_j) = Q(x_j) - Q_{\text{пред}}(x_j) = 0,3;$$

- H_0 – гипотеза о недостижимости этого порогового уровня разности в j -м контроле знаний обучаемого;
- $P_j(H_1/1), P_j(H_0/1)$ – апостериорные вероятности соответственно о достижении и о недостижении порогового уровня разности $y_j(x_j)=0,3$ при условии положительного исхода j -го испытания, т.е. при условиях, определяемых выражениями (8);
- $P_j(H_1/0), P_j(H_0/0)$ – апостериорные вероятности, соответствующие достижению или недостижению порогового уровня разности $y_j(x_j)=0,3$ при условии, что в ходе очередного контроля ЗУН был получен результат оценки $q_j = 0$.

Используя известные правила преобразования вероятностей и в соответствии с теоремой Байеса, текущие отношения правдоподобия можно представить в виде:

$$l(q_j=1) = \frac{P_j(1/H_1)P_j(H_1)}{P_j(1/H_0)P_j(H_0)}; \quad l(q_j=0) = \frac{P_j(0/H_1)P_j(H_1)}{P_j(0/H_0)P_j(H_0)}.$$

Если принять во внимание, что априорная информация о достижении порогового уровня разности $y_j(x_j) = Q(x_j) - Q_{\text{пред}}(x_j) = 0,3$ отсутствует, то $P_j(H_1)=P_j(H_0) = 0,5$. В этом случае формула (10) примет следующий вид:

$$\frac{\alpha}{1-\beta} \leq \prod_{j=1}^k \left(\frac{P_j(1/H_1)}{P_j(1/H_0)} \right)^{q_j=1} \left(\frac{P_j(0/H_1)}{P_j(0/H_0)} \right)^{q_j=0} \leq \frac{1-\alpha}{\beta}. \quad (11)$$

Результаты текущих оценок разностей между уровнями обученности обучающегося и его предельными значениями непосредственно связаны с рисками оценки его знаний в процессе обучения [5]. Ошибки в оценках знаний могут приводить к ошибочным оценкам не только собственно знаний обучаемого, но и его предельного уровня обученности, а следовательно, и к ошибочным выводам о необходимости перехода на новую стратегию обучения. Будем рассматривать с одной стороны ситуацию, когда обучаемый дает правильный ответ в ходе очередного j -го контроля знаний, так как обладает таковыми (вероятность такого события обозначим P_{ij}), а с другой – этот исход носит случайный характер (вероятность этого события обозначим P_{cj}). Тогда вероятность того, что следует ожидать положительный исход его j -го испытания при условии справедливости гипотезы H_1 , будет равна: $P_j(1/H_1) = 1 - (1 - P_{ij})(1 - P_{cj}) = 1 - \alpha_j$. При этом вероятность случайного правильного ответа (положительный исход при условии справедливости гипотезы H_0) может быть определена как $P_j(1/H_0) = P_{cj} = \beta_j$. В этом случае $P_j(0/H_1) = 1 - P_j(1/H_1) = \alpha_j$; $P_j(0/H_0) = 1 - P_j(1/H_0) = 1 - \beta_j$. Тогда, подставляя полученные значения в (11) и логарифмируя, получим следующее выражение алгоритма принятия решения о переходе на новую стратегию обучения:

$$0 \leq -\log \frac{\alpha}{1-\beta} \sum_{j=1}^k [q_j \log \frac{1-\alpha}{\beta} + (1-q_j) \log \frac{\alpha}{1-\beta}] \leq \log \frac{(1-\alpha)(1-\beta)}{\alpha\beta} \quad (12)$$

В этом выражении верхний и нижний пороги принятия решения равны:

$$\Pi_b = \log \left[\frac{(1-\alpha)(1-\beta)}{\alpha\beta} \right]; \quad \Pi_n = 0; \quad W_0 = -\log \left[\frac{\alpha}{1-\beta} \right],$$

где W_0 – начальный вес принятия решения.

Для практической реализации данного алгоритма попытаемся определить вероятности P_{ij} и P_{cj} с учетом значимости (сложности) учебного материала и количества n_i операций, выполняемых при решении j -го задания на рассматриваемом этапе обучения. Возможно несколько подходов к определению значимости заданий, например экспертная оценка, математическое моделирование, оптимизация структуры задания каждого типа по критериям истинности и случайности правильных ответов, экспериментальный подход и др. В результате будем считать, что определено несколько градаций γ значимости заданий. Ограничимся тремя града-

циями: $\gamma = 1$ – для задания повышенной сложности; $\gamma = 2$ – для задания средней сложности; $\gamma = 3$ – для задания пониженной сложности.

Опираясь на статистические данные обучения, можно определить процент обучаемых, способных выполнять задания повышенной, средней или пониженной сложности. Эти данные, например, могут быть распределены следующим образом: 20%, при $\gamma = 1$; 40%, при $\gamma = 2$; 80%, при $\gamma = 3$ для обучаемых, занимающихся на отлично хорошо и удовлетворительно и отлично соответственно. Вероятность P_{cj} случайного правильного ответа зависит, например, от возможного количества угадываний $n_j(\gamma)$ промежуточных операций, необходимых для выполнения j -го задания и т.п. Поскольку в данном случае максимальная неопределенность при угадывании результата одной промежуточной операции характеризуется вероятностью 0,5, то вероятность случайного правильного ответа $P_{ci} = 0,5^{n(\gamma)}$. В этом выражении и количество угадываний n промежуточных операций и вероятность P_{ci} случайного правильного ответа зависят от градации γ значимости заданий, т.е. от $n_i(\gamma)$ и, следовательно, $P_{cj}(\gamma)$. Безусловно, на практике могут быть использованы и другие методы оценки априорных вероятностей, отражающих реальные требования и особенности изучаемого учебного материала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенная в статье методика решает одну из важнейших задач трансформационной теории обучения, а именно – определения временных и внутрисистемных условий перехода на новую стратегию обучения. В данном случае под внутрисистемными условиями (факторами и т.п.) мы понимаем не только сугубо методологическую и методическую основу образовательного процесса, но и весь спектр внутренних ресурсов и средств обучающей среды, формирующей будущего специалиста. В этом отношении хотелось бы отметить, что авторы не ограничивают процессы трансформации только лишь, например, изменениями методических приемов или форм проведения занятий, а рассматривают и формы личностных (а в некоторых случаях и межличностных), психологических и иных методов воздействия на обучающихся, как необходимые условия трансформационных изменений, связанных не только с учебным процессом, а в ряде случаев с перестройкой психологии личности, межличностных отношений, мотивационной основы деятельности и т.п. Однако часть этих аспектов трансформационного подхода к обучению и воспитанию будущих специалистов требуют самостоятельных исследований. Вместе с тем необходимо учитывать, что любые трансформационные изменения всегда носят комплексный характер, обеспечивая тем самым их максимальное воздействие.

Список используемых источников

1. Венда В.Ф. Системы гибридного интеллекта. Эволюция, психология информатика. – М.: Машиностроение, 1990. – 448 с.
2. Басова Н.В. Педагогика и практическая психология. – Ростов н/Д: Феникс, 2000. – 416 с.
3. Сергеев С.Ф. Обучающие и профессиональные иммерсивные среды. – М.: Народное образование, 2009. – 432 с.
4. Беспалько В.П. Образование и обучение с участием компьютеров (педагогика третьего тысячелетия). – Воронеж: Издательство НПО «МОДЭК», 2002. – 352 с.
5. Багрецов С.А., Тарасов А.В., Ачкасов Н.Б. Психолого-педагогический эксперимент: организация и методы обработки результатов: монография. – СПб., 2008. – 347 с.
6. Козлов В.Н. Системный анализ, оптимизация и принятие решений: учеб. пособие. – М.: Проспект, 2014. – 176 с.

7. Экономика-математические методы и прикладные модели: учеб. пособие для вузов / В.В. Федосеев, А.Н. Гармаш, Д.М. Дайибегов и др.; под ред. В.В. Федосеева. – М.: ЮНИТИ, 1999. – 391 с.
8. Малая группа: структура, отношение, лидерство: учеб. пособие / С.А. Багрецов, В.М. Львов, О. Лонес. и др. – Тверь, 2008. – 236 с.
9. Диагностика социально-психологических характеристик малых групп с внешним статусом. Сер.: Учебники для вузов. Специальная литература / С.А. Багрецов, К.М. Оганян, В.М. Львов и др. – СПб.: Лань, 1999. – 640 с.
10. Введение в эргономику / Г.М. Зараковский, Б.А. Королев, В.И. Медведев и др. – М.: Советское радио, 1974. – 352 с.
11. *Дружинин В.Н.* Когнитивные способности: структура, диагностика, развитие. – М.: ПЕР СЭ; СПб.: ИМАТОН-М, 2001. – 248 с.
12. *Козлов В.Н.* Математика и информатика. – СПб.: ПИТЕР, 2004. – 230 с.
13. Построение автоматизированной информационно-образовательной среды подготовки военных специалистов на базе учебно-тренировочных средств радиоэлектронных станций дальнего обнаружения / С.А. Лепешкин, А.С. Логовской, В.Я. Пророк и др. // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 664. – С. 151–161.
14. *Багрецов С.А., Черная Т.Э.* Модель трансформационного процесса индивидуально-группового обучения в вузе // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 667. – С. 400–409.

И.Ю. Воронков,
кандидат военных наук, доцент;
М.А. Голубев,
кандидат военных наук, доцент;
Л.В. Мержвинская,
кандидат военных наук;
Н.А. Репях,
кандидат философских наук, доцент

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПЛАНИРОВАНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ВОЕННОЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ В УСЛОВИЯХ ВНЕДРЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ СРЕДЫ

В публикации изложены результаты анализа функционирования системы планирования военных образовательных организаций высшего образования, представлены основные принципы и подходы к совершенствованию планирования деятельности вуза МО РФ в условиях внедрения электронной информационно-образовательной среды, позволяющие обеспечить системность планирования, оптимальность количества планов и ответственность за их разработку.

Ключевые слова: военная образовательная организация, электронная информационно-образовательная среда, планирование деятельности, матрица планирования, принципы планирования.

Современная система военного образования представляет собой отлаженный и эффективно работающий механизм, целью которого является подготовка квалифицированных военных кадров, способных успешно решать задачи как в мирное, так и в военное время. В условиях развития системы образования Российской Федерации приоритетной задачей в подготовке военных кадров в настоящее время выступает совершенствование нормативной правовой базы и, главное, обеспечение способности оперативно реагировать на потребности войсковой практики. Требуется максимально использовать возможности, предоставляемые вузам Федеральным законом Российской Федерации от 29 декабря 2012 года № 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации», который окончательно «встроил» военное образование в общую систему образования страны и предоставил организациям, осуществляющим образовательную деятельность, широкие полномочия в образовательном процессе. Прежде всего для военных образовательных организаций высшего образования МО РФ (далее – вуз МО РФ) – это право устанавливать квалификационные требования к военно-профессиональной подготовке выпускников, самостоятельно определять особенности организации и осуществления образовательной, методической, воспитательной, научной (научно-исследовательской) деятельности, определять перечень информации для размещения в открытых информационно-телекоммуникационных сетях и т.д.

Вместе с тем, получив широкие права, многие вузы МО РФ либо не могут ими в полной мере распорядиться, либо принимают локальные акты, противоречащие федеральной правовой базе, что определило объективную необходимость разработки научно обоснованной модели перспективной военной образовательной организации высшего образования МО РФ.

С целью решения данной задачи вузы МО РФ в рамках выполнения комплексной научно-исследовательской работы (далее – КНИР) «Перспективный вуз – 2018» проводят исследования и осуществляют разработку такой модели, которая будет соответствовать требованиям современной нормативной правовой базы Российской Федерации, специфике осуществления направлений деятельности вузов МО РФ, существующим и перспективным информационным и педагогическим технологиям, применяемым в образовательном процессе. Одним из

важнейших элементов данной модели является система планирования деятельности вузов МО РФ. Для Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского в КНИР определено решение научных задач, направленных на исследование системы планирования деятельности перспективного вуза МО РФ, к которым относятся следующие:

- обобщение и анализ опыта по формированию и развитию системы планирования деятельности вузов МО РФ в условиях развертывания электронной информационно-образовательной среды (далее – ЭИОС) подготовки военных кадров, выявление существующих противоречий и обоснование путей их решения;
- исследование существующей системы организации и ведения образовательной деятельности вузов МО РФ, обоснование перечня, форм и содержания документов, регламентирующих ее.

Анализ деятельности вузов МО РФ показал наличие в планировании их деятельности типичных проблем.

Так, в планировании деятельности вузов МО РФ не всегда достигаются:

- централизованность, когда подчиненные уровни управления при планировании должны получать и принимать к исполнению задачи, поставленные вышестоящими начальниками, руководствоваться их планами;
- ориентированность основных мероприятий деятельности и работ на конечный результат;
- соответствие выбранных способов и порядка выполнения поставленных задач (мероприятий) имеющимся в распоряжении силам, средствам и ресурсам;
- взаимосогласованность всех планирующих документов;
- распределение ответственности за подготовку и проведение мероприятий, своевременное доведение задач, основных мероприятий и порядка их выполнения до непосредственных организаторов и исполнителей.

Кроме того, к недостаткам системы планирования в вузах МО РФ необходимо отнести:

- избыточность по количеству планов и мероприятий;
- дублирование мероприятий различными структурными подразделениями;
- планирование мероприятий осуществляется не всегда конкретно;
- отсутствие единой системы планирования и внутренней структуры взаимодействия между элементами планов.

Например, в соответствии с указаниями Главнокомандующего ВКС в вузах должно разрабатываться 57 форм документов по планированию деятельности образовательной организации. Система планирования деятельности вуза МО РФ должна строиться на основе требований определенных принципов, позволяющих осуществлять планирование в ЭИОС (табл. 1) [1–3].

Таблица 1

Принципы системы планирования основных видов деятельности в условиях внедрения ЭИОС

№ п/п	Название принципа	Характеристика принципа	Особенности реализации принципа в вузе МО РФ	Возможности реализации для ЭИОС
1	Принцип единства	Все структурные подразделения вуза так или иначе организуют свою деятельность для выполнения главной задачи – ре-	В вузах МО РФ разрабатывается План-календарь основных мероприятий на год, который включает мероприятия по разным направлениям и таким образом затрагивает все	Все пользователи имеют доступ к системе планирования в соответствии с политикой разграничения прав и обязанностей;

Продолжение табл. 1

№ п/п	Название принципа	Характеристика принципа	Особенности реализации принципа в вузе МО РФ	Возможности реализации для ЭИОС
		лизации основных профессиональных образовательных программ в вузе	структурные подразделения, отражая реализацию основных видов деятельности	каждый выполняет свою функцию в соответствии с должностными обязанностями (руководящий состав, сотрудник службы, профессорско-преподавательский состав, научный сотрудник)
2	Принцип участия	Все без исключения должностные лица вуза вовлечены в процесс планирования	Личное планирование непосредственно связано с планами вуза, структурных подразделений	Каждый пользователь системы любого уровня имеет возможность в «Личном кабинете» разрабатывать планы как личные, так и по направлениям деятельности
3	Принцип непрерывности	Образовательная деятельность вуза осуществляется постоянно, разделяясь на периоды	Планирование в вузе осуществляется на долгосрочную перспективу – на год, на период обучения и на месяц. Таким образом охватываются все этапы подготовки обучающихся	Планирование основных видов деятельности вуза ведется в ЭИОС постоянно
4	Принцип гибкости	В связи с изменениями «среды» (законодательство, стандарты подготовки, квалификационные требования)	Планы могут перерабатываться, корректироваться, дополняться в зависимости от периода подготовки и корректировки при выполнении оперативных задач	Благодаря функциям, заложенным для пользователей в их «Личном кабинете», существует возможность корректировать план в зависимости от степени ограничения его функций
5	Принцип точности	Планы должны содержать конкретные мероприятия, исключая обозначения направления деятельности	План должен содержать показатель достижения целей	В ЭИОС должны быть возможности для реализации функции контроля выполнения мероприятия и демонстрации результатов

Окончание табл. 1

№ п/п	Название принципа	Характеристика принципа	Особенности реализации принципа в вузе МО РФ	Возможности реализации для ЭИОС
6	Принцип системности	Планирование не может осуществляться для одного подразделения независимо от других подразделений. Оно согласуется на всех уровнях, как по горизонтали, так и по вертикали	Всё планирование в вузе представляет собой систему, а не набор отдельных документов, включая как индивидуальное, так и общее планирование	ЭИОС основана на работе подсистем, доступ к которым ограничен в зависимости от уровня пользователя

В рамках исследования, проведенного в Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, а также с учетом предложений соисполнителей КНИР разработана и обоснована матрица планирования основных видов деятельности вуза МО РФ, включающая 31 документ (табл. 2) [4, 5].

Таблица 2

Матрица планирования основных видов деятельности вуза МО РФ

№ п/п	Наименование планирующего документа	Место разработки плана				Ответственный за разработку
		вуз	факультет	кафедра	структурное подразделение	
1	План-календарь основных мероприятий на год	+	+	–	–	НУМО, НФ
2	План-календарь основных мероприятий на месяц	+	+	+	+	НУМО, НФ, НК, НО
3	План работы кафедры на год	–	–	+	–	НК
4	План работы отдела на год (на примере научно-исследовательского отдела)	–	–	–	+	Начальник структурного подразделения
5	План работы ученого совета на год	+	+	–	–	Ученый секретарь ученого совета
6	Индивидуальный план работы преподавателя, научного сотрудника	–	–	+	+	НК, НО
7	График-календарь образовательного процесса на год/семестр	+	выписка	выписка	–	НУМО
8	Учебный план (по специальности, специализации, направлению подготовки)	+	копия	выписка	–	НУМО
9	Расписание учебных занятий на семестр	+	выписка	выписка	выписка	НУМО
10	Расписание промежуточной аттестации	+	выписка	выписка	–	НУМО

Продолжение табл. 2

№ п/п	Наименование планирующего документа	Место разработки плана				Ответственный за разработку
		вуз	факультет	кафедра	структурное подразделение	
11	План профессиональной переподготовки и повышения квалификации постоянного состава вуза на текущий год и на последующий плановый период	–	выписка	выписка	выписка	НУМО
12	Тематический план профессионально-должностной подготовки военнослужащих и подготовки гражданского персонала по специальности на учебный год	+	выписка	выписка	выписка	НУМО
13	Расписание занятий по профессионально-должностной подготовке военнослужащих и подготовке гражданского персонала по специальности на месяц	–	–	+	+	Руководители групп ПДП
14	План развития и совершенствования учебно-материальной базы вуза на год и последующий плановый период	+	выписка	выписка	выписка	НУМО
15	Тематический план изучения учебной дисциплины	–	–	+	–	НК
16	Индивидуальные учебные планы обучающихся (слушателей и курсантов)	–	+	–	–	НФ
17	План ликвидации академических задолженностей в вузе	–	+	выписка	–	НФ
18	План методической деятельности вуза на учебный год	+	выписка	выписка	выписка	НУМО
19	План контроля учебных занятий руководящим составом	+	+	–	–	НУМО, НФ
20	План научной работы вуза на год и плановый период последующих двух лет	+	выписка	выписка	выписка	Отдел (ОНР и ПНПК)
21	Перспективный план подготовки научно-педагогических и научных кадров вуза	+	выписка	выписка	выписка	НОтдела (ОНР и ПНПК)
22	План подготовки научно-педагогических кадров на год	+	выписка	выписка	выписка	НОтдела (ОНР и ПНПК)
23	План сохранения и наращивания научного потенциала		выписка	выписка	выписка	НОтдела (ОНР и ПНПК)
24	План издания служебных произведений вуза на год	+	выписка	выписка	выписка	НУМО

Окончание табл. 2

№ п/п	Наименование планирующего документа	Место разработки плана				Ответственный за разработку
		вуз	факультет	кафедра	структурное подразделение	
25	План военно-научной работы слушателей и курсантов вуза на учебный год	+	выписка	выписка	выписка	НОтдела (ОНР и ПНПК)
26	План работы военно-научного общества (секции) слушателей и курсантов кафедры на учебный год	–	–	+	–	НК
27	Индивидуальный план работы адъюнкта	–	–	+	–	НК
28	Индивидуальный план работы докторанта	–	–	+	–	НК
29	Комплексный план военно-политической работы вуза на учебный год	+	выписка	выписка	выписка	НОтдела ВПР
30	План психопрофилактической работы с личным составом вуза на год	+	выписка	выписка	выписка	НОтдела ВПР
31	План военно-политической работы вуза на месяц	+	выписка	выписка	выписка	НОтдела ВПР

Примечание. В столбце «факультет» обозначено структурное подразделение, имеющее в своем составе кафедры; а в столбце «структурное подразделение» – научные подразделения (научно-исследовательский институт), отделы, факультеты, не имеющие в своем составе кафедры.

Представленная матрица планирования позволяет исключить дублирование в создании плана, провести разграничение ответственности за выполнение и контроль мероприятий, что, в свою очередь, важно для уточнения функций пользователей при создании и внедрении типовых форм планирующих документов в ЭИОС.

В части планирования и организации образовательного процесса предложена разработка:

– учебно-методическим отделом двенадцати документов, включая планы-календари основных мероприятий на год и месяц, график-календарь образовательного процесса на год/семестр, расписание учебных занятий на семестр и расписание промежуточной аттестации, план издания служебных произведений вуза на год, которые доводятся до факультетов и кафедр и являются для них основой при планировании своих мероприятий;

– факультетами пяти документов, включая планы-календари основных мероприятий на год и месяц, план контроля учебных занятий руководящим составом;

– кафедрами восьми документов, включая план работы кафедры на год, план-календарь основных мероприятий на месяц, индивидуальные планы работы преподавателей, тематические планы изучения учебных дисциплин, план работы военно-научного общества (секции) слушателей и курсантов на учебный год, индивидуальные планы работы адъюнктов и докторантов.

Предложенный перечень документов даст возможность оптимизировать и обеспечить сквозное планирование мероприятий, а использование единых электронных макетов документов – включить планирование в структуру электронной информационно-образовательной среды (ЭИОС) вуза МО РФ, представленной на рис. 1 [4].

Анализ деятельности вузов МО РФ показал, что в системе планирования их деятельности присутствуют только отдельные элементы, представленные в виде разработки электронных

документов и возможности электронного документооборота между ограниченным количеством отделов и служб. Так, например, на портале академии в разделе «Документы» можно найти материалы, размещаемые отделами и службами для руководства деятельностью структурных подразделений, но в своем большинстве это документы в форматах MS Word, MS Excel, PDF. Такой подход не отвечает требованиям реализации системы электронного документооборота, в котором доведение планов и указаний, отчетов об их исполнении должно осуществляться в режиме реального времени (при необходимости с прикреплением подтверждающих и отчетных документов).

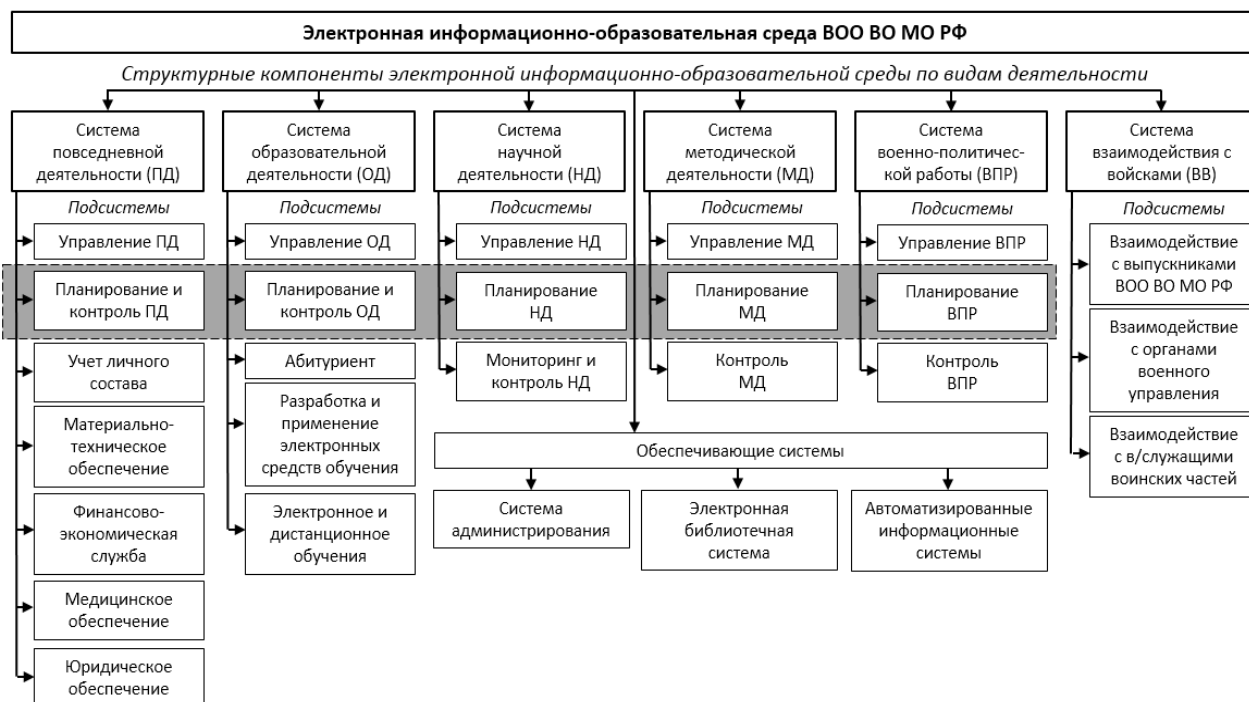


Рис. 1. Место планирования в структуре ЭИОС вуза МО РФ

В 2018 году в академии сформирован отдел информационных технологий. Основными результатами его работы в настоящее время является формирование в сети академии системы личных кабинетов (<http://e-cab.vka>) и системы электронного обучения (<http://e-d.vka>), базы данных которых требуют заполнения. Очевидно, что в таком же формате целесообразно создать и систему планирования деятельности академии, в которой будет сосредоточена работа по планированию мероприятий и контролю их исполнения по направлениям деятельности.

Таким образом, в ходе первого этапа КНИР «Перспективный вуз – 2018» были решены задачи разработки, методологических оснований планирования, которые включают в себя: уточнение места планирования основных видов деятельности вуза МО РФ в системе ЭИОС; обоснование возможностей реализации основных принципов планирования вуза в ЭИОС; уточнение критериев планирования основных видов деятельности вуза МО РФ в условиях функционирования ЭИОС; оптимизация численности планов, в том числе и определение ответственности за разработку конкретных планирующих документов; обоснование типологии системы планирования деятельности вуза МО РФ.

Список используемых источников

1. Бадеева Е.А. Методический подход к оценке гибкости внутривузовского процесса планирования качества услуг // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1. – URL: <http://www.science-education.ru/121-17577> (дата обращения: 15.02.2019).

2. *Новиков Д.А.* Теория управления образовательными системами. – М., 2009. – 416 с.
3. Управление факультетом: учебник / под ред. С.Д. Резника. – М., 2012. – 695 с.
4. Отчет о составной части комплексной научно-исследовательской работы «Перспективный вуз – 2018» (промежуточный). – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2018. – 373 с.
5. Российская Федерация. Министерство обороны Российской Федерации. О мерах по реализации отдельных положений статьи 81 Федерального закона от 29 декабря 2012 г. № 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации»: приказ Министра обороны Российской Федерации от 15 сентября 2014 г. № 670 // Справочная правовая система «КонсультантПлюс». – URL:http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_170951/ (дата обращения: 09.01.2019).

Я.В. Дашкевич;
А.М. Девяткин,
доктор техн. наук, профессор;
А.В. Панков,
кандидат военных наук, доцент

МЕТОД РАНДОМИЗАЦИИ ВЫБОРКИ, ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ПРИ ОБУЧЕНИИ НЕЙРОСЕТИ В ЗАДАЧАХ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ОРИЕНТАЦИИ КАНДИДАТОВ ДЛЯ ПОСТУПЛЕНИЯ В ВОЕННЫЙ ВУЗ

Предлагается способ подготовки выборки для обучения нейросети в условиях, когда имеющийся объем обучающей выборки недостаточен. В основу данного способа положена рандомизация имеющихся данных. Проверка проводится на примере решения задачи использования нейросетей для профессиональной ориентации абитуриентов военного вуза.

Ключевые слова: нейросеть, рандомизация, обучающая выборка, профессиональный отбор.

ВВЕДЕНИЕ

Одна из современных тенденций развития информационных технологий заключается в широком использовании для решения практических задач нейросетей. В основном указанные задачи лежат в русле распознавания и идентификации частично наблюдаемых объектов. Яркими примерами использования нейросетевых технологий являются: распознавание объектов на изображениях, интерпретация речи, а также создание диалоговых систем искусственного интеллекта типа Алиса или Watson [1, 2].

Особенностью использования нейросети является процесс ее обучения. Для этого необходима обучающая выборка достаточно большого размера. Например, при обучении системы автоматического распознавания изображений кошек в корпорации Google использовалось около 30000 фотографий кошек [3]. Однако в ряде случаев могут возникнуть проблемы с формированием обучающей выборки требуемого объема.

Мы полагаем, что в некоторых случаях формирование обучающей выборки необходимого объема может быть осуществлено на основе рандомизации уже имеющейся обучающей выборки малого объема. Возможность применения данного подхода проиллюстрируем на примере решения задачи профессионального отбора кандидатов для поступления в военный вуз.

ФОРМАЛЬНАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ РАНДОМИЗАЦИИ ОБУЧАЮЩЕЙ ВЫБОРКИ

Пусть $P_{\langle R \rangle} = \langle p_1, p_2, \dots, p_R \rangle$ – вектор признаков, которые нейросеть использует для идентификации состояния S рассматриваемого объекта. Возможные состояния заданы множеством $\{S_i\}_I$, где I – число состояний объекта. Нейросеть обеспечивает отображение $P_{\langle R \rangle} \rightarrow \tilde{S}$: $\tilde{S} = f(P_{\langle R \rangle}; A_{\langle \rangle})$, где \tilde{S} – оценка состояния объекта; $A_{\langle \rangle}$ – параметры модели нейросети; $f(P_{\langle R \rangle}; A_{\langle \rangle})$ – функция, символизирующая отображение аргумента $P_{\langle R \rangle}$ при заданных параметрах $A_{\langle \rangle}$ в значение S_i . Вид функции $f(\cdot)$ зависит от структуры и вида используемой модели нейросети. Отметим, что при обучении нейросети определяются (уточняются, находятся) параметры $A_{\langle \rangle}$. Изначально нам задана малая выборка $\{P_{\langle R \rangle}\}_M$ объемом M штук

векторов $P_{\langle R \rangle}$ признаков состояния S . Каждое значение вектора $P_{\langle R \rangle j}$ соответствует известному состоянию S_{ij} , где $i \in \{1, 2, \dots, I\}$, индекс j – номер значения вектора $P_{\langle R \rangle}$ и соответствующего ему значения S_{ij} , в обучающей выборке $\{P_{\langle R \rangle j}, S_{ij}\}_M$. На рис. 1 приведена общая схема обучения нейросети с использованием обучающей выборки. Система обучения нейросети адаптирует коэффициенты A_{\diamond} так, чтобы снизить, как правило, среднее квадратическое расхождение между \tilde{S}_i и S_i .

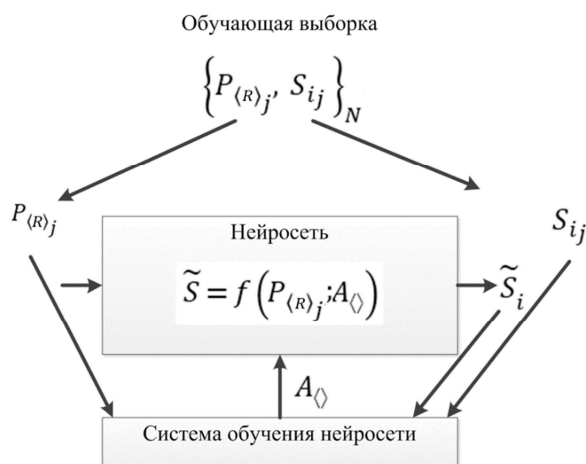


Рис. 1. Схема обучения нейросети

Поскольку объем обучающей выборки может быть недостаточен, задача заключается в увеличении объема N обучающей выборки. Предлагается решать данную задачу путем рандомизации значений векторов $P_{\langle R \rangle j}$ из имеющихся пар $\langle P_{\langle R \rangle j}, S_{ij} \rangle$. Рандомизация заключается в ослучаивании заданной доли элементов $P_{\langle R \rangle}$. Тем самым мы имитируем возможные вариации признаков, соответствующих конкретной ситуации S_i . Вариации могут быть обусловлены ошибками наблюдения или случайной природой признаков.

МОДЕЛЬ ПРЕДРАСПОЛОЖЕННОСТИ АБИТУРИЕНТА К ВИДУ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Для иллюстрации возможности рандомизации обучающей выборки, во-первых, рассмотрим возможность использования нейросети для оказания помощи абитуриенту в выборе специальности подготовки. Выбор специальности подготовки в силу ограниченности информации об особенностях военной службы связан с большим числом неопределенностей. Неправильный выбор приведет к разочарованию и отсутствию необходимой мотивации к профессиональной деятельности.

Для примера предположим, что профессиональная деятельность выпускника военного вуза объединяет в себе следующие виды деятельности: S_1 – эксплуатационную; S_2 – организационно-управленческую; S_3 – производственно-технологическую и проектно-конструкторскую; S_4 – научно-исследовательскую.

Априорная предрасположенность абитуриента к специальности профессиональной деятельности может быть оценена на основе обобщенной эталонной модели предрасположенности абитуриента к виду профессиональной деятельности, составленной по результатам экспертного анализа результатов профессионального отбора и успешности последующей деятельности выпускников [4]. Указанная эталонная модель приведена в табл. 1. В модели указаны 16 признаков предрасположенности к виду профессиональной деятельности. Каждый

признак дискретен и бинарен. Для каждого вида S_i представлены эталонные значения признаков $P_{(16)} = \langle p_1, p_2, \dots, p_{16} \rangle$.

Таблица 1

**Модель эталонных признаков предрасположенности абитуриента
к виду профессиональной деятельности**

Элементы p_g признака состояния	Описание элементов вектора $P_{(R)}$ признака состояния предрасположенности к виду профессиональной деятельности (регистрируется группой профессионального отбора)		Состояния (S_i), характеризующие предрасположенность абитуриента к виду профессиональной деятельности			
			S_1	S_2	S_3	S_4
<i>Оценивание общего уровня подготовленности абитуриента (результат больше 75 баллов – 1, в прот. сл. – 0)</i>						
p_1	Рез.	Физика	1	0	1	1
p_2	ЕГЭ	Математика	0	0	1	1
p_3		Русский язык и литература	0	1	0	0
p_4	Экз.	Физическая подготовленность	1	1	0	0
<i>Оценивание интересов, склонности и увлечений абитуриента (наличие признака, подтвержденного документом – 1, в прот. сл. – 0)</i>						
p_5	Интересы, склонности, увлечения абитуриента	Окончено среднее образовательное учреждение с математическим уклоном	0	0	1	1
p_6		Окончено среднее образовательное учреждение с гуманитарным уклоном, или имеются сертификаты об уровне владения иностранными языками	0	1	0	0
p_7		Окончено среднее образовательное учреждение со спортивным уклоном, или имеются спортивные разряды	0	1	0	0
p_8		Окончен кадетский корпус, СВУ	1	1	0	1
p_9		Имеется опыт, связанный с моделированием технических процессов (аэромоделирования, конструирования моделей судов и т.д.)	0	0	1	1
p_{10}		Имеется опыт, связанный с участием в деятельности творческих коллективов (театральная студия, литерат. кружки, музыкальные уч. заведения)	1	1	0	0
p_{11}		Имеется опыт программирования работы вычислительных устройств, сертификаты участия в олимпиадах и конкурсах по программированию	1	0	1	1
p_{12}		Имеется опыт, связанный с деятельностью поисковых и туристических организаций (секции, кружки и т.д.)	1	1	0	0
p_{13}		Имеется опыт, связанный с руководством малыми коллективами (капитан команды, староста класса и т.д.)	0	1	0	0
p_{14}		Имеется опыт, связанный с деятельностью патриотических организаций (ЮнАрмия и др.) или сданы нормы ГТО	0	1	0	0
p_{15}		Имеется опыт, связанный с участием в научной деятельности (участие в конференциях, докладах и т.д.)	0	0	1	1
p_{16}		Имеется опыт, связанный с ремонтом и управлением техническими средствами (или документ на право управления техническими средствами передвижения)	1	0	1	1

Поскольку при выявлении признаков могут быть ошибки, связанные со случайностью признаков, с ошибками идентификации признаков, субъективным фактором личностей аби-

туриента и эксперта, то возможно отличие эталонных значений признаков от значений признаков индивидуального абитуриента, соответствующих виду S_i профессиональной деятельности. Поэтому представляется целесообразным использовать нейросетевую модель для выявления рекомендуемых видов профессиональной деятельности в рассматриваемых условиях неполной наблюдаемости предрасположенностей абитуриента.

Для обучения нейросетевой модели нужна обучающая выборка $\{P_{\langle 16 \rangle}, S_i\}_N$ объема N , где $i \in \{1, 2, 3, 4\}$. Важным условием формирования обучающей выборки выступает ее репрезентативность, под которой в контексте аналитических технологий понимается наличие достаточного количества разнообразных обучающих примеров, отражающих правила и закономерности, которые «должны быть обнаружены нейросетевой моделью» в процессе обучения. Репрезентативность обучающей выборки характеризуется тремя аспектами: достаточностью, разнообразием и равномерностью представления классов возможных ситуаций [5, 6].

В общем виде необходимый объем обучающей выборки определяется спецификой решаемой задачи и спецификой выбранной структуры нейронной сети (количество скрытых слоев и нейронов в них, а также вид активационной функции нейронов). По этой причине ее требуемый объем чаще всего определяется экспериментальным путем при достижении требуемой результативности решения задачи распознавания.

Исходя из свойств нейронных сетей, применительно к рассматриваемой задаче число нейронов входного слоя равно числу значений признаков, задаваемых вектором $P_{\langle R \rangle}_j$, и равно 16, а число выходных нейронов соответствует конкретной ситуации S_i и равно 4.

Считается, что задачу любой сложности можно решить при помощи двухслойной нейросети, а для решения большинства практических задач подойдет однослойная нейросеть. При обосновании объема обучающей нейронную сеть выборки необходимо руководствоваться следующим правилом: количество примеров в обучающей выборке должно быть на порядок выше, чем количество связей между нейронами [7, 8, 9].

Для многослойной сети число нейронов в скрытом слое должно превышать число нейронов во входном слое в $1,5 \div 2$ раза [10]. Таким образом, общее число нейронов во входном и скрытом слоях составит $2,5 \cdot n \div 3 \cdot n$. Так как сеть полносвязная, т.е. каждый нейрон предыдущего слоя соединен со всеми нейронами следующего слоя, то число связей между 1-м и 2-м слоями равно $2n^2$.

Общее же число связей для двухслойной сети: $k = 2n^2 + 2nm = 2n(n + m)$, где n – число входных нейронов, m – число выходных нейронов [6]. Применительно к решаемой задаче характерное потребное значение N в случае использования однослойной нейросети составит $N > 1000$, а для реализации двухслойной нейросети $N > 7000$. Таким образом, налицо необходимость увеличения объема выборки N .

РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА РАНДОМИЗАЦИИ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ НЕЙРОСЕТИ НА ПРИМЕРЕ ЗАДАЧИ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОТБОРА

Итак, рандомизацию вектора признаков можно осуществить путем мутации (изменения) заданной доли (δ) значений p_i элементов вектора $P_{\langle 16 \rangle}$ эталонных признаков.

Анализ результатов работы групп профессионального отбора, связанный с разделением абитуриентов на группы в соответствии с реализуемыми направлениями подготовки, свидетельствует о характерном значении доли мутаций признаков $\delta \leq 30\%$ в сравнении с эталонами. Показатели получены для одного из курсов академии $\{P_{\langle 16 \rangle}, S_i\}_{80}$ на основе данных

профотбора и отзывов на этих же курсантов – выпускников академии, написанных через год службы в войсках.

Таким образом, рандомизация обеспечивается путем генерации «допустимых мутаций» ($\delta \leq 30\%$) относительно эталонных значений вектора признаков состояния S_i . Схема, иллюстрирующая реализацию рандомизации эталонных значений признаков, представлена на рис. 2.



Рис. 2. Схема рандомизации эталонных векторов признаков ситуаций для формирования обучающей выборки требуемого объема N

В качестве исходных данных выступают эталонные вектора $P_{\langle 16 \rangle i}^{\exists}$ признаков ситуаций S_i , $i \in \{1,2, \dots, t\}$. В рамках рассматриваемого примера $t = 4$. К исходным данным также отно-

сятся доли мутаций признаков δ . Важным этапом является формирование вектора мутаций $\hat{T}_{(16)} = \langle \hat{t}_1, \hat{t}_2, \dots, \hat{t}_{16} \rangle$, где \hat{t}_i являются независимыми случайными бинарными величинами, принимающими значение 1 с вероятностью δ и значение 0 с вероятностью $1 - \delta$. Суммирование по модулю 2 элементов векторов $\hat{T}_{(16)}$ и $P_{(16)}^{\exists}$ позволяет получить r -тую реализацию рандомизированного (мутированного) вектора признаков состояния S_i :

$$\hat{P}_{(16)r}^R = P_{(16)i}^{\exists} \oplus \hat{T}_{(16)}.$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО РАНДОМИЗАЦИИ ОБУЧАЮЩЕЙ НЕЙРОСЕТЬ ВЫБОРКИ НА ПРИМЕРЕ ЗАДАЧИ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОТБОРА (ВЫБОРА)

При проведении эксперимента использовалась приведенная в табл. 1 модель эталонных признаков, соответствующих предрасположенности абитуриента к четырем видам профессиональной деятельности. Объем сформированной на основе предложенной схемы рандомизации векторов признаков ситуаций для обучающей выборки составил 1000 значений. В качестве реализации обучающей нейросети использовалось открытое программное обеспечение [11]. В данной реализации управляемое обучение проводилось с использованием метода Ф. Розенблатта, состоящего в итерационной подстройке матрицы весов, последовательно уменьшающей ошибку в выходных векторах. Сформированная рандомизированная выборка разделялась на два подмножества данных в следующем соотношении: 80% – данные для обучения нейросети, 20% – данные для тестирования качества обучения. Анализировалось качество правильной идентификации ситуаций S_i для моделей с 1, 2, 3 и 10 уровнями (слоями нейросети). На каждом уровне размещались 16 нейронов.

Результаты проведенного эксперимента для различных моделей нейросети представлены на рис. 3.

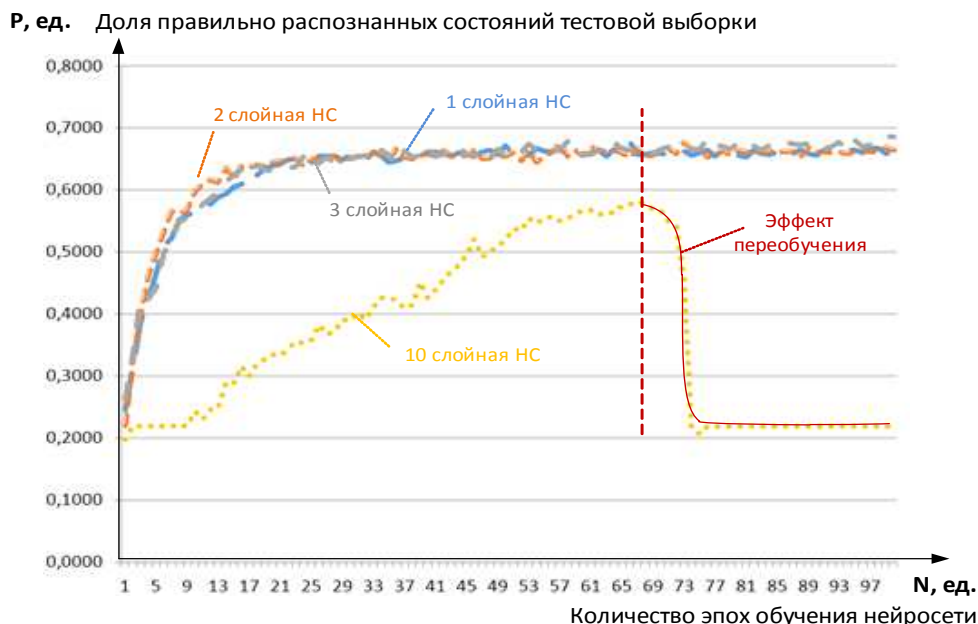


Рис. 3. Графики вероятностей правильного распознавания ситуаций S_i на тестовой выборке в зависимости от числа эпох обучения и используемых параметров модели нейросети

Как следует из приведенных графиков, модели нейросети с одним, двумя и тремя уровнями обучаются быстрее, чем модель с 10 уровнями. Кроме того, качество правильной идентификации для моделей с одним, двумя и тремя уровнями примерно одинаково, а также значительно выше, чем качество модели с 10 уровнями. Для графика модели с 10 уровнями наблюдается характерный спад в интервале 70÷75 эпох, что объясняется эффектом переобучения нейросети [12], обусловленным большим числом параметров модели.

Обеспечиваемые значения (~0,67) вероятности правильного распознавания предрасположенности абитуриента к виду профессиональной деятельности свидетельствуют о хорошем практическом потенциале использования предлагаемой технологии для профессиональной ориентации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен метод рандомизации обучающей выборки, позволяющий получить выборку необходимого объема для обучения нейросети. Проведенные эксперименты по использованию нейросети для решения задачи профессиональной ориентации абитуриентов продемонстрировали возможность разработки средств автоматизации профориентации абитуриентов военных вузов.

Представляется, что метод рандомизации обучающей выборки может широко использоваться при формировании обучающей выборки потребного объема.

Список используемых источников

1. *Поллак Г.А.* Интеллектуальные информационные системы: учеб. пособие. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. – 141 с.
2. *Николенко С., Кадури А., Архангельская Е.* Глубокое обучение. Погружение в мир нейронных сетей. – СПб.: Питер, 2018. – 480 с.
3. Создаем нейросеть InceptionV3 для распознавания изображений. – URL: <https://habr.com/ru> (дата обращения: 16.06.2019).
4. *Мартышенко Н.С.* Исследование процессов, влияющих на удовлетворенность студентов выбором специальности // Современное образование. – 2017. – №4. – С. 131. – URL: <https://nbpublish.com> (дата обращения: 12.06.2019).
5. Официальный сайт ООО «BaseGroupLab». Репрезентативность данных (Representativeness of data) // BaseGroup Labs – Глоссарий. – URL: <http://www.basegroup.ru/glossary/definitions/representativeness/> (дата обращения: 21.05.2019).
6. Ian H. Witten, Eibe Frank and Mark A. Hall Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques. – 3rd Edition. – Morgan Kaufmann, 2011. – 664 p.
7. *Горожанина Е.И.* Нейронные сети: учеб. пособие. – Самара: ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики», 2017. – С. 55.
8. Официальный сайт ООО «Нейронные технологии». – URL: <https://neural-technologies.com> (дата обращения: 21.05.2019).
9. Официальный сайт ООО «BaseGroupLab», NeuralBase – нейронная сеть за 5 минут. – URL: <http://basegroup.ru> (дата обращения: 21.05.2019).
10. *Хайкин С.* Нейронные сети: полный курс Neural Networks: A Comprehensive Foundation. – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2006. – 1104 с.
11. Открытый интернет-ресурс облачного сервиса «Google Colaboratory». – URL: <https://colab.research.google.com> (дата обращения: 25.05.2019).
12. Dropout – метод решения проблемы переобучения в нейросетях. – URL: <https://habr.com/ru> (дата обращения: 16.06.2019).

Л.А. Иноземцева;
Н.С. Кужекин,
кандидат философских наук, профессор

ЛИЧНОСТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЕ ОБУЧЕНИЕ ПЕДАГОГИЧЕСКИХ РАБОТНИКОВ АКАДЕМИИ В ХОДЕ ОСВОЕНИЯ ПРОГРАММ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ПЕРЕПОДГОТОВКИ И ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ

В публикации рассматриваются актуальные проблемы профессиональной переподготовки и повышения квалификации профессорско-преподавательского состава академии на основе личностно-ориентированного обучения.

Ключевые слова: личностно-ориентированное обучение, профессиональная переподготовка, повышение квалификации, педагогические технологии, самообразование, личностное развитие преподавателя, мотивация, педагогическое творчество.

В настоящее время система военного образования предъявляет высокие требования к подготовке преподавателей высшей военной школы. Возрастает потребность военных вузов в высококвалифицированных научно-педагогических кадрах, способных решать комплексные задачи по подготовке конкурентоспособных специалистов. В этих условиях преподаватель высшей военной школы должен обладать отвечающими этим требованиям профессиональными компетенциями: способностью организовывать образовательную деятельность на основе современных достижений психолого-педагогической науки и практики, технологий в конкретной отрасли знания и предметной области; проектировать образовательный процесс в целом и отдельные учебные занятия как часть целого на основе системно-деятельностного и компетентностного подходов; планировать результаты образовательной деятельности и разрабатывать в соответствии с ними контрольно-измерительные материалы и другие оценочные средства; обоснованно выбирать и эффективно использовать образовательные технологии, методы и средства обучения; разрабатывать комплексное методическое обеспечение преподаваемых учебных дисциплин; использовать в образовательной деятельности электронные образовательные и информационные ресурсы и технологии [2].

Анализ подготовки преподавательского состава в академии свидетельствует о том, что традиционные методы проведения учебных занятий ориентируют обучение на усвоение набора знаний, умений и навыков, что не решает проблемы личностного и профессионального развития, лежащего в основе компетентностного подхода.

Задачей кафедры подготовки и повышения квалификации педагогических работников образовательных организаций МО РФ становится поиск таких образовательных технологий, которые в условиях сокращения учебного времени на освоение дополнительных профессиональных программ профессиональной переподготовки и повышения квалификации позволят сохранить высокий уровень подготовки педагогических работников. Одной из таких технологий является, на наш взгляд, личностно-ориентированный подход к профессиональной переподготовке и повышению квалификации педагогических работников академии.

В трудах отечественных педагогов Е.В. Бондаревской, И.С. Якиманской, А.В. Хуторского и других авторов отмечается, что основой личностно-ориентированного обучения является такая организация взаимодействия субъектов образовательного процесса, которая позволяет реализовать условия для формирования в процессе взаимодействия преподавателя и обучающихся способности к саморазвитию, самообразованию и самореализации в сфере профессиональной деятельности [1, 4, 5]. В личностно-ориентированном обучении обозначен

принципиальный акцент на двусторонности образовательного процесса. Субъектами в данном случае становятся как преподаватель, так и обучающийся. Взаимодействие между этими участниками ведет к их саморазвитию и самореализации, что и составляет сущность личностно-ориентированного обучения.

Личностно-ориентированный подход определяет главной задачей обучения формирование индивидуальности обучающегося. Становление индивидуальности подразумевает творческий поиск возможностей самообучения и саморазвития, соответствующих способностям и личностным особенностям обучающихся.

Личностно-ориентированное обучение педагогических работников в системе дополнительного профессионального образования академии должно учитывать:

- индивидуальные особенности обучающихся при составлении образовательных программ и учебных планов;
- возможность проектирования обучающимися индивидуального образовательного процесса;
- возможность индивидуального планирования и выбора предпочтительных учебных дисциплин слушателями;
- возможность контроля личных достижений;
- междисциплинарный подход.

Инструментами создания необходимых условий для раскрытия личностного и интеллектуального потенциала обучающихся и активизации их познавательной активности являются:

- применение активных и интерактивных методов и форм организации учебного процесса, которые позволяют проявить субъектный опыт обучающихся;
- активизация познавательного интереса каждого слушателя;
- поощрение у обучающихся групповых обсуждений, использование различных приемов выполнения учебных заданий;
- оценка учебной деятельности обучающихся как по результату, так и по процессу его выполнения;
- стимулирование стремления обучающихся в поиске способа решения задачи, оценки его у других слушателей, совместного выбора наиболее оптимального решения;
- создание педагогических ситуаций на занятиях, которые способствуют проявлению самостоятельности, инициативности, ответственности обучающихся;
- использование современных образовательных технологий.

Личностно-ориентированное содержание профессиональной переподготовки и повышения квалификации педагогических работников требует для своей реализации оптимальных педагогических технологий, которые характеризуются сотрудничеством, творчеством, ориентацией на поддержку личностного развития обучающегося, предоставлением ему свободы для принятия самостоятельного решения, выбора способов и средств учения, совместным творчеством субъектов образовательного процесса.

Педагогические технологии личностно-ориентированного обучения включают совокупность целенаправленных, взаимосвязанных и технологически упорядоченных действий профессорско-преподавательского состава и обучающихся, которые позволяют наделить учебно-познавательную деятельность обучающихся личностным смыслом, создать развивающую образовательную среду на учебных занятиях на кафедре. Это достигается посредством введения в учебный процесс педагогических ситуаций, доказывающих их практическую значимость, индивидуализацией (персонализацией) практической направленности обучения педагогических работников, которая реализуется во всех основных компонентах образовательной деятельности на кафедре, созданием возможности выбора учебного материала, его актуальности и новизны, форм активности на учебных занятиях, а также разнообразных учебных заданий, выбора форм и способов их самостоятельного выполнения.

Методы и методики обучения, реализуемые на кафедре, способствуют эффективному педагогическому общению, индивидуализации обучения, раскрытию творческого потенциала

обучающихся. Важным условием при этом становится поддержание высокого уровня учебной мотивации обучающихся: занятия проводятся так, чтобы слушатели групп повышения квалификации постоянно испытывали нарастание сложности учебных заданий, положительные эмоции в атмосфере требовательно-доброжелательной обстановки, были заняты напряженной исследовательской и творческой работой, участвовали в групповых обсуждениях и дискуссиях.

На кафедре большое значение придается чтению проблемных лекций, которые побуждают обучающихся к поисковой деятельности. Такой вид учебной лекции обеспечивает развитие аналитического и профессионального мышления, устойчивого познавательного интереса и высокой положительной мотивации к учебному процессу.

Семинары с использованием метода «мозговой атаки» представляют собой максимально сложную творческую мыслительную работу обучающихся по поиску нестандартных решений на поставленные задачи в короткие сроки. Данный вид учебной работы способствует развитию у обучающихся интеллектуальных, творческих, личностных качеств и возможности реализации их в будущей профессиональной деятельности.

На занятиях практической направленности эффективны такие интерактивные методы обучения, как кейс-технологии, деловые и ролевые игры. Так, основным материалом при реализации кейс-технологий является кейс (пакет), описывающий информацию о проблеме в профессиональной деятельности преподавателя. Слушатели, используя приобретенные теоретические знания, анализируют и обсуждают проблемную ситуацию, предложения по ее решению, которые затем оцениваются экспертами, назначенными из слушателей группы. В процессе поиска эффективного решения развиваются такие важные для преподавателя высшей военной школы составляющие компетентности, как высокая мотивация, инициативность, творчество, гибкость мышления. Путем педагогического моделирования различных ситуаций слушатели обучаются принятию решений.

Ролевые игры, используемые на практических занятиях кафедры, также стимулируют слушателей к познавательной активности. Они создают оптимальные условия для установления обратной связи с преподавателем и активного совместного творчества. Ролевые игры позволяют обучающимся быстрее принимать новые идеи, изменять собственные негативные установки, а также помогают определить сильные и слабые стороны в учебном процессе. Эти методы позволяют существенно повысить познавательную активность слушателей, что способствует значительному росту их компетентности, а также помогают развить такие профессионально значимые качества, как ответственность, самостоятельность, способность формулировать проблему, а также коммуникативные способности, такие как лидерские качества, умение работать в команде.

В рамках профессиональной переподготовки обучающиеся готовят рефераты по предметной области дисциплины. Реферат представляет собой работу учебного или научно-методического характера, которая свидетельствует о способности обучающегося осуществлять обоснованный выбор и эффективное использование образовательных технологий, способов и средств обучения, а также разработку методического обеспечения учебной дисциплины профильной кафедры.

Значительный интерес представляет выполнение обучающимися в рамках учебной дисциплины «Технологии профессионально-ориентированного обучения» практикума, который включает разработку и обсуждение слушателями основных учебно-методических материалов: рабочей программы учебной дисциплины, фрагмента тематического плана изучения дисциплины, планов проведения занятия, текстов лекции по одной из тем дисциплины профильной кафедры, заданий на семинарские и практические занятия, оценочных материалов для проведения текущего контроля успеваемости и др. В результате каждый слушатель к окончанию обучения имеет не только навыки преподавателя по разработке основных учебно-методических материалов, но и комплект их образцов для дальнейшей профессиональной деятельности.

При освоении дополнительных профессиональных программ повышения квалификации педагогических работников обучающиеся разрабатывают индивидуальные задания. Индивидуальное задание представляет собой работу учебно-методического характера, свидетельствующую о способности обучающегося проводить самостоятельную разработку актуальных образовательных и методических задач, используя знания и умения, полученные при изучении учебных дисциплин дополнительной профессиональной программы повышения квалификации педагогических работников. Индивидуальное задание направлено на формирование способности оценивать роль и место актуальных знаний и умений по предмету в профессиональной деятельности, организовать образовательную деятельность на основе современных достижений психолого-педагогической науки и практики, планировать результаты образовательной деятельности и разрабатывать соответствующие контрольно-измерительные оценочные материалы [3].

Тематика индивидуальных заданий разрабатывается на кафедре, обсуждается на ее заседании, утверждается заведующим кафедрой перед началом или в начале периода обучения по программе повышения квалификации педагогических работников и доводится до обучающихся.

При разработке тематики индивидуальных заданий учитываются многие факторы: актуальность задач, решаемых преподавательским составом академии; состояние реальной педагогической практики; целесообразность и возможность использования результатов в личной профессиональной деятельности; соответствие содержания задач времени, выделенному на его выполнение.

В качестве примера приведем тематику индивидуальных заданий, выполненных слушателями группы повышения квалификации педагогических работников в 2018–2019 учебном году.

Были предложены следующие темы индивидуальных заданий:

1. Порядок организации и осуществления рубежного контроля успеваемости слушателей и курсантов по учебной дисциплине (по выбору).
2. Оценивание результатов обучения по учебной дисциплине (по выбору) в ходе промежуточной аттестации.
3. Опыт (кафедры, преподавателя), проблемы и предложения по совершенствованию оценки компетенций как планируемых результатов освоения образовательных программ.

Тему индивидуального задания слушатели группы повышения квалификации выбирают самостоятельно, разрабатывают и оформляют в виде реферата. Для оказания помощи обучающимся на кафедре разрабатывают методические рекомендации по выполнению индивидуальных заданий.

Завершается выполнение индивидуального задания его защитой на кафедре. Обучающийся должен продемонстрировать умение кратко и аргументированно изложить полученные результаты, а также возможность их использования в образовательной деятельности при реализации рабочей программы конкретной учебной дисциплины. Защита индивидуального задания проводится в форме индивидуального собеседования.

Большое внимание на кафедре уделяется индивидуальному консультированию преподавателей, обучающихся в группах повышения квалификации педагогических работников. Консультацию можно получить как у назначаемых ежедневно дежурных консультантов, так и у любого преподавателя с учетом конкретной предметной области обучения по программе.

Использование вышеописанных методов является достаточно успешным при реализации личностно-ориентированного обучения в академии. Личностно-ориентированный подход формирует познавательный потенциал личности обучающихся, способствует активной самостоятельной деятельности по разрешению противоречий, накоплению практических навыков, развитию аналитических способностей, создает условия для раскрытия своих творческих возможностей, предоставляет возможность для самоопределения и самореализации в педагогической деятельности.

Особое значение в подготовке преподавателей высшей военной школы имеет образовательная среда, стимулирующая внедрение активных методов обучения в контексте профессионально-ориентированного обучения, а также ориентированная на создание условий для раскрытия творческого и личностного потенциала профессорско-преподавательского состава, обучающегося по программам переподготовки и повышения квалификации.

Список используемых источников

1. *Бондаревская Е.В.* Личностно-ориентированное образование: опыт разработки парадигмы. – Ростов-на-Дону, 2009. – 128 с.
2. Дополнительная профессиональная программа повышения квалификации педагогических работников. Утверждена начальником ВКА им. А.Ф. Можайского 22 марта 2014 г. – СПб., 2014. – 8 с.
3. Примерная дополнительная профессиональная программа профессиональной переподготовки военных специалистов для выполнения нового вида профессиональной деятельности в сфере педагогики высшей школы. Утверждена статс-секретарем – заместителем Министра обороны Российской Федерации 28 февраля 2017 г. – М., 2017. – 23 с.
4. *Хуторской А.В.* Методика личностно-ориентированного обучения. Как обучать всех по-разному? – М.: ВЛАДОС-ПРЕСС, 2005. – 383 с.
5. *Якиманская И.С.* Технология личностно-ориентированного образования. – М.: Сентябрь, 2000. – 187 с.

В.О. Кацик,
кандидат техн. наук, доцент;
С.Н. Кокшаров,
кандидат военных наук

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ВИДЕОКОНФЕРЕНЦИИ НА ЗАНЯТИЯХ ПО ОПЕРАТИВНО-ТАКТИЧЕСКИМ ДИСЦИПЛИНАМ

Рассмотрен результат педагогического эксперимента, целью которого являлось повышение эффективности и качества обучения курсантов академии при проведении групповых упражнений и практических занятий по оперативно-тактическим дисциплинам с использованием информационно-коммуникационных технологий. Даны предложения по использованию видеоконференции на этих занятиях.

Ключевые слова: информационно-коммуникационные технологии, повышение эффективности обучения, педагогический эксперимент, видеоконференция.

Необходимость применения информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) в военном образовании обуславливается целым рядом факторов, главными из которых являются следующие [1]:

- внедрение ИКТ в военное образование существенным образом повышает эффективность учебного процесса, ускоряя передачу знаний обучающимся, накопление боевого опыта;
- современные ИКТ, повышая качество обучения и военного образования, позволяют обучающимся более успешно адаптироваться к происходящим изменениям в военном деле;
- активное внедрение ИКТ в военном образовании способствует обновлению системы обучения в вузах Министерства обороны Российской Федерации (МО РФ) в соответствии с требованиями современной военной науки и педагогики.

Под информационно-коммуникационными технологиями обычно понимается совокупность методов, производственных процессов и программно-технических средств, интегрированных с целью сбора, обработки, хранения, распространения, отображения и использования информации в интересах ее пользователей [2].

Эффект их применения в первую очередь зависит от профессиональной компетенции преподавателя, его умения обоснованно включать ИКТ в образовательный процесс, создавая положительную мотивацию и психологический комфорт, способствуя развитию умений и навыков обучающихся [3].

Проведенные исследования показали, что ИКТ принадлежат к числу эффективных средств обучения, все чаще применяемых при проведении занятий по оперативно-тактическим дисциплинам (ОТД), так как они способствуют активизации мышления курсантов и усиливают их взаимосвязь с преподавателем [4].

Особый эффект применения ИКТ достигается при проведении занятий практической направленности (групповые упражнения и практические занятия), но многообразие их форм и способов проведения требует дополнительных теоретических и методических исследований. Также следует отметить, что современные ИКТ предоставляют дополнительные возможности для формирования и развития профессиональной компетенции курсантов, что является в настоящее время определяющим в развитии военного образования.

Использование существующих ИКТ при проведении занятий практической направленности по ОТД, как правило, должно ставить своей целью реализацию таких задач, как:

- развитие системности в оперативно-тактическом мышлении курсантов;
- поддержка познавательной деятельности курсантов в приобретении профессиональных знаний;

– развитие и закрепление навыков и умений курсантов в уяснении поставленных задач, оценке обстановки и принятии решения;

– развитие навыков курсантов в разработке и оформлении боевых документов.

Анализ процесса обучения курсантов по ОТД показал, что традиционно используемые методы обучения не в полной мере обеспечивают должный уровень профессиональной подготовки будущих офицеров. Одним из путей решения этой проблемы является внедрение в учебный процесс курсантов современных ИКТ.

Для доказательства повышения эффективности учебных занятий практической направленности по ОТД на кафедре оперативного искусства и тактики был проведен педагогический эксперимент.

В ходе проведения эксперимента предполагалось выявить качественные различия в формировании компетенций у курсантов в условиях традиционно сложившейся системы проведения занятий практической направленности и с использованием ИКТ.

В педагогическом эксперименте принимали участие четыре учебных группы. С двумя из них занятия проводились с применением традиционных методов, а с двумя другими – с использованием ИКТ.

Эксперимент продолжался десять месяцев, в ходе него было проведено три групповых упражнения и двенадцать практических занятий, что соответствовало рабочей программе по учебной дисциплине «Тактика сил запуска и управления космическими аппаратами».

В качестве основных показателей в определении компетентности курсантов были приняты:

- способность курсанта уяснять поставленную задачу старшего начальника (командира);
- способность курсанта докладывать обстановку и делать выводы по ней;
- способность курсанта самостоятельно принимать решение в сложившейся обстановке;
- способность курсанта правильно составлять боевые документы и оформлять их с соблюдением штабной культуры.

Обязательными условиями чистоты эксперимента были приняты:

- одинаковый временной интервал проведения занятий;
- одинаковый объем доводимого учебного материала;
- отработка вводных согласно методическим рекомендациям по проведению занятий.

В двух контрольных группах занятия проводились по обычной технологии, а в двух экспериментальных – решение тех же задач выполнялось с использованием ИКТ.

В процессе проведения занятий ИКТ использовались в следующих случаях:

- при проведении контрольного опроса в начале занятий;
- при доведении содержания вводных в ходе занятий;
- при доведении различных команд и сигналов боевого управления и оповещения в ходе занятий;
- при доведении кодограмм и радиограмм в ходе занятий;
- во время оформления ответов на вводные;
- во время оформления ответов на кодограммы и радиограммы;
- во время оформления боевых документов.

Эффективность влияния применения ИКТ на качество знаний, умений и навыков курсантов при проведении занятий оценивалась путем сравнения полученных результатов контрольных и экспериментальных групп в течение всего времени проведения эксперимента. За результаты контроля были взяты оценки, выставленные курсантам при проведении рубежных контролей (РК) и промежуточных аттестаций (ПА) [зачет с оценкой (ЗО) и экзамен (Э)].

Результаты успеваемости курсантов контрольных и экспериментальных групп сводились в таблицу и после математической обработки данных была построена диаграмма, которая показана на рис. 1.

Проведенные расчеты по итогам эксперимента показали, что по всем изученным темам рабочей программы прирост в оценке знаний, умений и навыков курсантов экспериментальных групп оказался на 5–10 % выше, чем у курсантов контрольных групп.

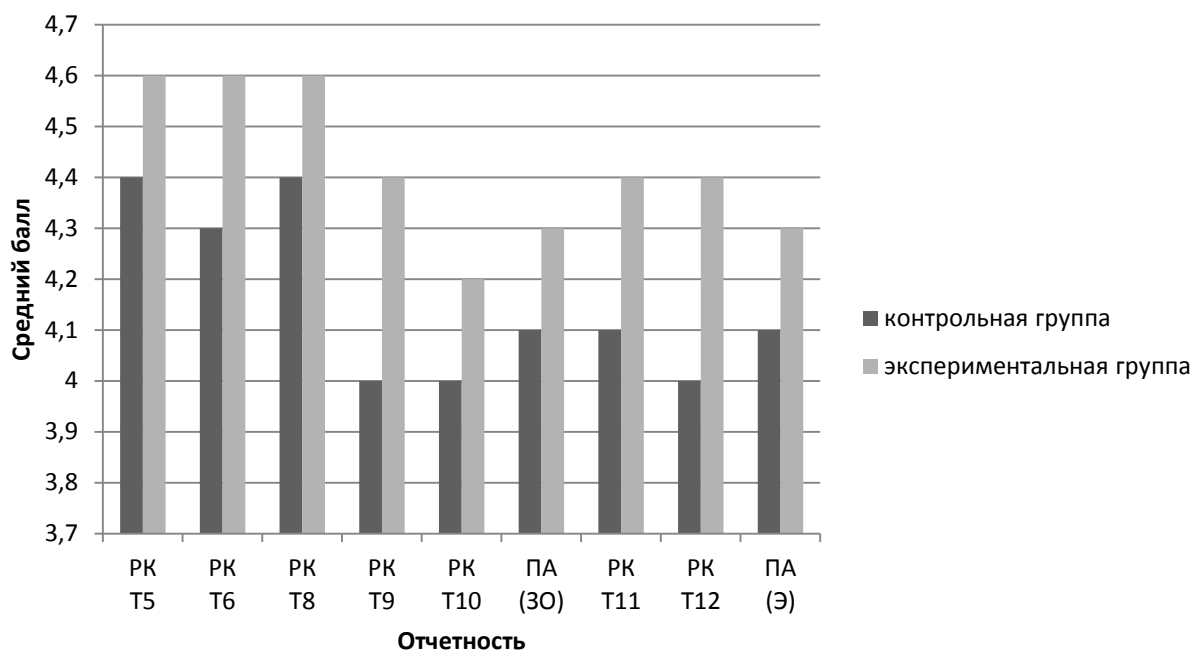


Рис. 1. Результаты успеваемости курсантов

Эксперимент показал, что использование ИКТ при проведении занятий практической направленности по ОТД способствует лучшему усвоению изучаемого материала, особенно в вопросах уяснения поставленных задач, оценки обстановки, принятия решений в сложившейся обстановке, разработки и оформления боевых документов. Кроме того, отмечалось лучшее формирование у курсантов компетенций в вопросах управления подразделениями в различных условиях обстановки как в мирное, так и в военное время.

Таким образом, использование ИКТ при проведении занятий практической направленности по ОТД наглядно продемонстрировало свою эффективность, а внедрение ИКТ в учебный процесс на постоянной основе является весьма актуальной задачей.

Вместе с тем при подготовке и проведении описанного выше эксперимента не была использована весьма эффективная форма применения ИКТ – видеоконференция. Эта форма применения ИКТ является довольно сложной для реализации в учебном процессе, но по утверждению отдельных исследователей может значительно повысить компетенцию обучающихся, особенно при изучении ОТД.

Видеоконференция – это область информационной технологии, обеспечивающая одновременно двустороннюю передачу, обработку, преобразование и представление интерактивной информации на расстоянии в режиме реального времени с помощью аппаратно-программных средств вычислительной техники.

Исследования психологов показали, что в процессе телефонного разговора в среднем воспринимается около 20 % передаваемой информации, а в ходе личного общения – до 80 %. При использовании видеосвязи этот показатель достигает уровня 60 %. То есть была выявлена закономерность, что если в процессе общения собеседников по звуковому каналу добавляется визуальный невербальный язык (мимика, жесты и т.п.), то у собеседников повышается эффективность восприятия информации.

По своим психологическим параметрам видеосвязь достаточно близка к личному общению и намного превосходит возможности телефонной связи. Однако для того, чтобы обеспечить эффективное применение видеосвязи на занятиях, мало только слышать и видеть одного собеседника. Необходимо обеспечить возможность общения между собой нескольких собеседников. Такой режим работы видеосвязи называется видеоконференцией, он обеспечивает одновременную передачу видео, голоса и различных данных [5].

Применение видеосвязи (видеоконференции) при проведении занятий практической направленности по ОТД особенно эффективно будет в следующих случаях:

- при доведении телефонограмм до обучающихся;
- при доведении команд и сигналов боевого управления и оповещения до обучающихся;
- при заслушивании ответов обучающихся на вводные;
- при предоставлении обучающимися разработанных боевых документах;
- при контроле действий обучающихся в процессе занятия.

Так, при доведении телефонограмм до обучающихся преподаватель может контролировать Журнал принятых и отданных распоряжений и отслеживать весь процесс принятия решений по ним.

При доведении команд и сигналов боевого управления и оповещения до обучающихся отпадает необходимость в подтверждении обратным звонком достоверности переданного сигнала (команды), а это, в свою очередь, экономит время и занятость должностных лиц.

При заслушивании ответов обучающихся на вводные и при предоставлении ими разработанных боевых документах преподаватель имеет возможность контролировать правильность доклада и нанесение принятого решения на рабочую карту. При контроле действий обучающихся в процессе занятия будет достаточно одного преподавателя для проведения занятий с несколькими подгруппами.

Обобщая вышеизложенное, можно сделать вывод, что использование видеоконференции при проведении занятий практической направленности по ОТД позволяет существенно повысить уровень знаний, умений и навыков курсантов при изучении ОТД. В подтверждение этого вывода можно сослаться на пример использования видеосвязи при проведении командно-штабных военных игр с преподавательским составом и научными работниками академии в базе (обеспечения учебного процесса) (п. Лехтуси) в 2011–2013 г.

Таким образом, проведенный педагогический эксперимент показал, что внедрение в учебный процесс ИКТ позволит существенно повысить качество знаний, умений и навыков курсантов и будет способствовать повышению компетентности выпускников академии в вопросах ОТП.

Кроме того, внедрение в практику занятий практической направленности новой формы применения ИКТ – видеоконференции позволит еще больше повысить эффективность образовательного процесса и обеспечит выпуск из академии высококвалифицированных кадров для космических войск.

Список используемых источников

1. *Вербицкий А.А.* Психолого-педагогические особенности использования информационно-коммуникационных технологий как орудия образовательной деятельности. – URL: <http://academy.odoport.ru/documents/akadem/bibl/technology/interaction/9.2.htm> (дата обращения: 31.05.2019).

2. *Мазилкина И.В.* Информационно-коммуникационные технологии как средство формирования познавательной активности учащихся. – URL: <http://www.openclass.ru/io/10/mazilkina> (дата обращения: 31.05.2019).

3. Возможности применения информационно-коммуникационных технологий в открытом образовании. – URL: <http://www.ido.rudn.ru/Open/ikt/3.htm> (дата обращения: 31.05.2019).

4 *Ямалетдинова А.М., Медведева А.С.* Современные информационные и коммуникационные технологии в учебном процессе. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-informatsionnye-i-kommunikatsionnye-tehnologii-v-uchebnom-protsesse> (дата обращения: 31.05.2019).

5. Видеосвязь и видеоконференция. – URL: <https://skomplekt.com/solution/vid.htm> (дата обращения: 31.05.2019).

Н.С. Кужекин,
кандидат философских наук, профессор;
В.В. Мышко,
кандидат техн. наук, доцент;
В.А. Чикуров,
кандидат техн. наук, доцент

МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ОСНОВНОЙ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ УКРУПНЕННОЙ ГРУППЫ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ И НАПРАВЛЕНИЙ ПОДГОТОВКИ ВОЕННЫХ СПЕЦИАЛИСТОВ

Проанализирован опыт формирования основной профессиональной образовательной программы высшего образования (ОПОП ВО) и соответствующих фондов оценочных средств (ФОС) для проведения контроля успеваемости слушателей и курсантов Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, приводятся конкретные примеры и практические рекомендации по разработке ОПОП ВО и ФОС.

Ключевые слова: основная профессиональная образовательная программа высшего образования, показатели и критерии оценивания, индикаторы, фонд оценочных средств, оценочные и методические материалы.

Требования к уровню подготовки военных специалистов постоянно возрастают. В ряду направлений подготовки качественного военного специалиста важная роль принадлежит совершенствованию планирования образовательной деятельности. Ядром планирования является разработка ОПОП ВО. Сложность решения данной задачи заключается в том, что в рамках укрупненной группы специальностей/направлений (УГСН) существуют тесные связи между отдельными специальностями и специализациями. Например, в состав УГСН 09.00.00 «Информатика и вычислительная техника», в рамках только одного Федерального государственного образовательного стандарта (ФГОС) (уровень высшего образования – специалитет), специальность 09.05.01 «Применение и эксплуатация автоматизированных систем специального назначения» входит 21 специализация, которые имеют различную направленность подготовки (специализация программы специалитета или для краткости – специализация). Учитывая этот факт, авторы предлагают модель формирования ОПОП ВО для УГСН (рис. 1).

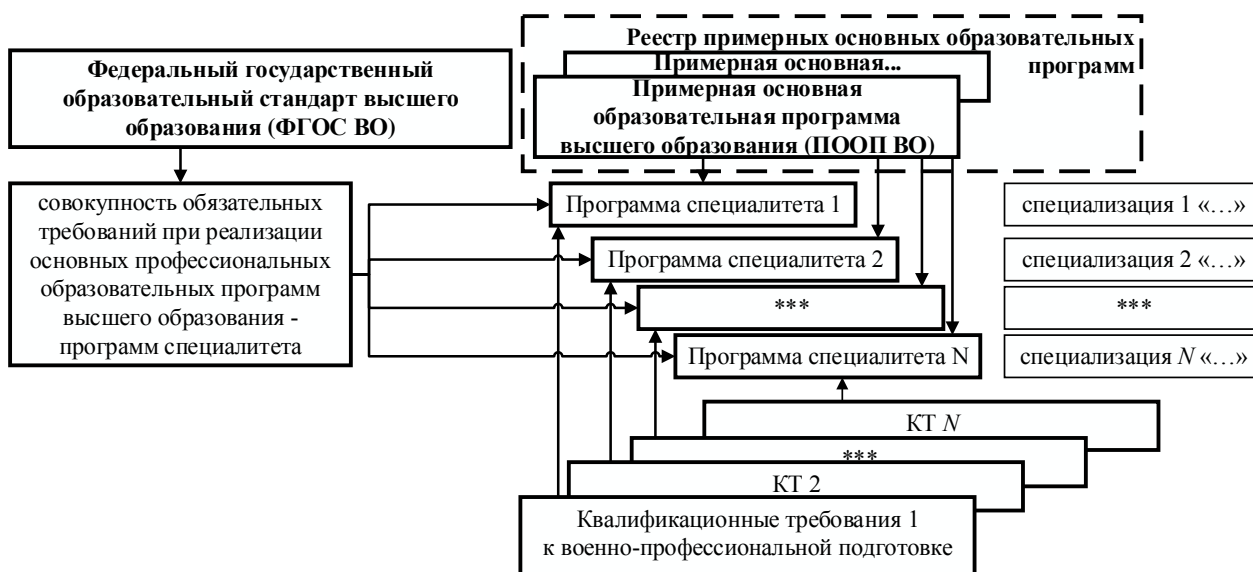


Рис. 1. Структура УГСН подготовки военных специалистов

На рисунке структурно представлена связь программ специалитета с ФГОС ВО, примерными основными образовательными программами высшего образования (ПООП ВО) и квалификационными требованиями (КТ) к военно-профессиональной подготовке военных специалистов в рамках УГСН. В одной образовательной организации в зависимости от направленности подготовки может проводиться обучение по отдельным (не обязательно всем) специализациям, включенным в состав ФГОС. Стоит отметить, что в рамках одной специальности на кафедре вуза может вестись подготовка как по одной, так и по нескольким специализациям, в соответствии с разработанными ОПОП ВО, которые по существу являются основным инструментом для повышения качества образования в сфере образовательных услуг Министерства обороны Российской Федерации.

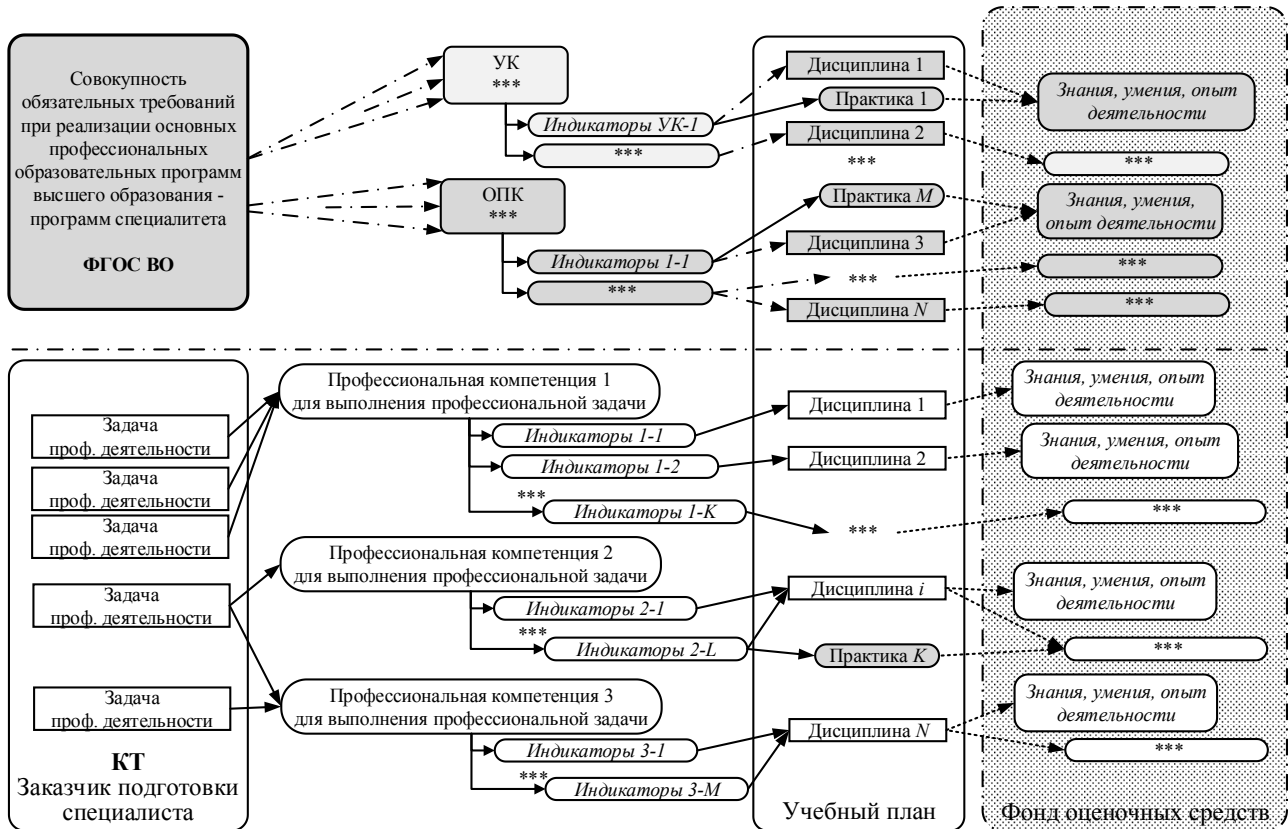


Рис. 2. Модель ОПОП высшего образования для УГСН подготовки военных специалистов

Рассмотрим модель формирования основной профессиональной образовательной программы высшего образования для укрупненной группы специальностей и направлений (рис. 2). В общем виде модель ОПОП высшего образования для УГСН подготовки военных специалистов может быть представлена кортежем

$$M_{УГСН} = \langle Z, O, K, I, B, V, \varphi, \psi \rangle, \quad (1)$$

где $M_{УГСН}$ – модель ОПОП для специальностей, входящих в УГСН;

Z – множество задач профессиональной деятельности, $Z = \{Z_i \mid i = \overline{1, m}\}$;

O – множество примерных основных образовательных программ высшего образования, $O = \{O_u \mid u = \overline{1, g}\}$;

K – множество компетенций, $K = \{K_j \mid j = \overline{1, n}\}$;

I – множество индикаторов, $I = \{I_{ij} \mid i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}\}$;

B – множество учебных дисциплин (практик), входящих в обязательную часть

- ОПОП по специальности, $\mathbf{B} = \{B_{j_{Баз}} \mid j_{Баз} = \overline{1, n_{Баз}}\}$;
- \mathbf{V} – множество учебных дисциплин (практик), выбранных самостоятельно участниками образовательных отношений, $\mathbf{V} = \{V_{j_{Вар}} \mid j_{Вар} = \overline{1, n_{Вар}}\}$;
- Φ, Ψ – операторы, описывающие учебный процесс.

При разработке основной профессиональной образовательной программы подготовки военных специалистов необходимо выделить общее (базовую составляющую) и частное (вариативную составляющую).

В обязательной (базовой) части выполняются требования, касающиеся формирования универсальных (УК) и общепрофессиональных компетенций (ОПК) при реализации ОПОП ВО.

Вариативная составляющая части обязательных требований, определенных ФГОС, в рамках УГСН касается формирования профессиональных компетенций, где сформированность компетенций обеспечивается «дисциплинами (модулями)» в рамках одного вуза, которые становятся едиными для УГСН и реализуются кафедрами вуза.

Особенностью стандартов ФГОСЗ++ является изменение требований к результатам освоения программы специалитета, при этом указывается, что образовательная организация высшего образования, осуществляющая обучение, устанавливает в программе специалитета индикаторы достижения следующих компетенций:

- 1) универсальных, общепрофессиональных и, при наличии, обязательных профессиональных компетенций – в соответствии с индикаторами достижения компетенций, установленными примерными основными образовательными программами (ПООП);
- 2) рекомендуемых профессиональных компетенций и самостоятельно установленных профессиональных компетенций (при наличии) – самостоятельно.

Образовательный процесс организуется по единым правилам: содержание рабочих программ учебных дисциплин (практик), входящих в обязательную часть, должно обеспечивать формирование у выпускника всех компетенций, определяемых ФГОС ВО по специальности, а также устанавливаемых ПООП в части обязательных профессиональных компетенций (ПК).

В соответствии с моделью (1) полагаются заданными $\mathbf{Z} = \{Z_i \mid i = \overline{1, m}\}$ – множество задач профессиональной деятельности, для решения которых необходимым и достаточным условием является приобретение обучающимися набора компетенций $\mathbf{K} = \{K_j \mid j = \overline{1, n}\}$, определяемых ФГОС и КТ. Решение задачи обеспечивается формированием ОПОП, учитывающей индикаторы компетенций $\mathbf{I} = \{I_{ij} \mid i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}\}$, на основании которых формируется перечень дисциплин (практик), обеспечивающих подготовку к решению задачи профессиональной деятельности. Качество подготовки определяется на основании соответствующих фондов оценочных средств, в которых с каждым индикатором сопоставлен необходимый уровень обученности.

Таким образом, в представленной модели четко прослеживается замкнутая цепочка: задача профессиональной деятельности – компетенция – индикатор компетенции – дисциплина (практика) – уровень обученности (готовность к решению задачи профессиональной деятельности).

Следующим этапом является процесс обучения, т.е. отыскание такого набора базовых \mathbf{B} и вариативных \mathbf{V} дисциплин, который позволит сформировать полный набор компетенций. Процесс обучения можно представить в виде отображения:

$$\Phi: \mathbf{Z} \times \mathbf{O} \times \mathbf{B} \times \mathbf{V} \rightarrow \mathbf{K}. \quad (2)$$

Структура учебного плана для УГСН подготовки военных специалистов по соответствующей ОПОП ВО включает в себя следующие элементы (рис. 3): обязательные (базовая и формируемая участниками образовательных отношений, единая для УГСН в рамках ФГОС)

части блоков 1 и 2, а также вариативные части в соответствии с направленностью (профилем, специализацией) профессионального цикла, которые могут быть сформированы в УГСН в соответствии с рекомендуемыми ПООП или выбранными самостоятельно участниками образовательных отношений, и блок 3 – Государственная итоговая аттестация.

Блок 1 «Дисциплины (модули)»		
Обязательная часть Блока 1 Б1.Д(М).Б Б1.Д(М).Б.1 Б1.Д(М).Б.2 ***	Вариативная часть Блока 1 <i>(индивидуальная для каждой специализации УГСН)</i> часть, формируемая участниками образовательных отношений	
	Б1.Д(М).В.Н1 Б1.Д(М).В.Н1.1 ***	Направленность (профиль, специализация) 1
Часть, формируемая участниками образовательных отношений (единая УГСН) Б1.Д(М).О Б1.Д(М).О.1 Б1.Д(М).О.2 ***	***	
	Б1.Д(М).В.НМ.1 Б1.Д(М).В.НМ.2 ***	*** специализация N
Блок 2 «Практика»		
Обязательная часть Блока 2 Б2.П.Б Б2.П.Б.1 Б2.П.Б.2 ***	Вариативная часть Блока 2 <i>(индивидуальная для каждой специализации УГСН)</i> часть, формируемая участниками образовательных отношений	
	Б2.П.В.НК Б2.П.В.НК.1 ***	Направленность (профиль, специализация) 1
Часть, формируемая участниками образовательных отношений (единая для УГСН) Б2.П.О Б2.П.О.1 ***	***	
	Б2.П.В.НК.N ***	*** специализация N
Блок 3 «Государственная итоговая аттестация»		

Рис. 3. Структура учебного плана для УГСН подготовки военных специалистов

Содержание рабочих программ учебных дисциплин и практик, входящих в блоки учебного плана, должно обеспечивать формирование у выпускника всех компетенций, индикаторы достижения которых прописаны в ОПОП (для УК, ОПК и ПК), а также учитывать квалификационные требования (КТ) заказчика подготовки и формировать вариативные дисциплины профессионального цикла, реализующие ПК (ВП.ПК).

В любом случае перечень обязательных дисциплин ОПОП, формирующих ОПК, должен быть составлен таким образом, чтобы было обеспечено формирование всех дидактических единиц, а также индикаторов достижения, установленных ПООП.

Формирование профессиональных компетенций, соответствующих специализации, исходит из потребностей заказчика подготовки специалиста, научно-исследовательских и материально-технических ресурсов организации. Для военных высших учебных заведений они могут быть установлены ПООП в качестве обязательных и (или) рекомендуемых, а могут быть выбраны самостоятельно в рамках УГСН, что определяется квалификационными требованиями к военно-профессиональной, специальной профессиональной подготовке вы-

пускников, установленными федеральным государственным органом, в ведении которого находится вуз. Исключение из ОПОП дисциплин, рекомендуемых ПООП, допускается в том случае, если другие дисциплины профессионального цикла позволяют обеспечить освоение всех компетенций, необходимых при подготовке специалиста.

Вариативная составляющая в соответствии с КТ должна выноситься в ту часть учебного плана, в которой отражается направленность (профиль, специализация). Формирование необходимых уровней обученности по этому направлению проводит выпускающая кафедра или другие кафедры после предварительного согласования.

Относительно дисциплин профессионального цикла стоит отметить тот факт, что совокупность компетенций, установленных программой специалитета, должна обеспечивать выпускнику способность осуществлять профессиональную деятельность не менее чем в одной области и (или) сфере профессиональной деятельности и (или) решать задачи профессиональной деятельности не менее чем одного типа, установленного соответствующим ФГОС ВО. Поэтому дисциплины профессионального цикла могут объединяться в рамках отдельных модулей, таких как, например, «Информационные технологии», «Техническая подготовка» и другие, при этом будут являться обязательными в рамках УГСН. Та же часть, которая оказывается невостребованной для отдельных специализаций, но необходима для других, объединяется в модуль вариативных дисциплин.

Дисциплины, которые ранее назывались «дисциплины специализации», в структуре ОПОП ВО вошли в обязательную часть профессионального цикла блока 1 в соответствии с направленностью подготовки.

Также в блок 3 «Государственная итоговая аттестация» в Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского как организации, осуществляющей подготовку кадров в интересах обороны государства, помимо государственного (итогового междисциплинарного по специальности) экзамена и защиты выпускной квалификационной работы входит государственный экзамен по физической подготовке.

Важным этапом является процесс контроля, т.е. отыскание такого набора оценочных средств, который позволит с уверенностью сказать, что выпускник, освоивший ОПОП, готов к решению любой задачи профессиональной деятельности по соответствующей специализации [3]. Например, для осуществления контроля можно использовать отображение

$$\psi: \mathbf{O} \times \mathbf{I} \times \mathbf{B} \times \mathbf{V} \rightarrow \mathbf{Z}. \quad (3)$$

В условиях перехода на ФГОСЗ++ (с учетом профессиональных стандартов), когда разработка новых стандартов не проводится и не требуется проведение новой аккредитации, стоит обратить внимание на такие элементы ОПОП ВО, как оценочные и методические материалы.

Создание фондов оценочных средств [1] является нетривиальной задачей, так как только качественно подготовленный комплект заданий и вопросов способен дать объективную оценку сформированности компетенций. Если проследить всего одну из «нитей», связывающих образовательный процесс в любой из образовательных организаций высшего образования, то можно заметить следующее: для заказчика подготовки специалиста не важно, в каком учебном заведении обучался специалист. Важно, чтобы специалист мог решать любые задачи, возникающие в процессе профессиональной деятельности. Эти требования формируются и представляются, как было отмечено ранее, в виде КТ. Для решения задачи профессиональной деятельности специалист должен обладать определенным набором компетенций, каждая из которых может иметь свои индивидуальные особенности, которые принято называть индикаторами.

Разработчик ОПОП должен отдавать себе отчет в том, что ни одна из обязательных, а также профессионально значимых для специализации компетенций не должны остаться без внимания. В рамках дисциплин и практик они должны быть явно указаны, в том числе прописаны индикаторы, а разрабатываемый фонд оценочных средств должен предоставить ин-

струментарий, позволяющий сопоставить планируемые и достигнутые результаты обучения, соответствующие заявленным уровням обученности: знания, умения, опыт деятельности.

Таким образом, при формировании ФОС необходимо обеспечить проверку всех индикаторов достижения компетенций в ОПОП и КТ.

Один ФГОС может быть связан с несколькими ПС, а поэтому потребуется проведение определенной аналитической работы, которая позволит классифицировать формируемые, с учетом требований работодателя, необходимые и достаточные для конкретной специальности компетенции.

В содержании примерной основной профессиональной образовательной программы указывается рекомендуемый формат представления по разработке ФОС для промежуточной аттестации, а также для программ государственной итоговой аттестации [например, на усмотрение федерального учебно-методического объединения (ФУМО)].

При формировании практически любой компетенций у обучающихся реализуется принцип междисциплинарного и модульного характера, то есть практически отсутствуют такие компетенции, которые формируются единственной дисциплиной. Учитывая этот факт, оценивание уровня сформированности компетенций предполагает разработку для каждой дисциплины, участвующей в формировании той или иной компетенции, фонда оценочных средств. Известно [1], что ФОС составляется для промежуточной аттестации по дисциплине или практике. При этом узловыми элементами являются типовые контрольные задания и другие методические материалы, необходимые для оценки знаний (вопросы или тесты), умений (задачи или задания на решение типовой проблемной ситуации), навыков и (или) опыта деятельности (задание, предполагающее решение нестандартной задачи), которые формируются в строгом соответствии с индикаторами достижения компетенций.

Стоит отметить, что формирование ФОС по специальности предусматривает разработку своего рода перечня типовых вопросов по всем компетенциям. Однако разработчику необходимо учитывать тот факт, что вопросы не должны повторяться, они должны быть включены в тестовые задания по той компетенции, по которой предусмотрена проверка уровня сформированности.

Таким образом, необходимо выбирать критерии оценивания сформированности компетенции для каждой дисциплины, участвующей в формировании конкретной компетенции.

Для оценивания уровня обученности «знать» рекомендуется сформировать перечень теоретических вопросов с учетом перекрестных связей дисциплин и компетенций. Эти перечни вопросов доступны для использования проверки знаний в форме тестирования.

Для оценивания компонентов «уметь» и «владеть» хорошо применять методику, которая носит явно выраженный прикладной характер. Стоит учесть, что модули в составе каждой дисциплины, участвующие в формировании компетенций, определяются преподавателем самостоятельно.

Контрольные задания разрабатываются заранее. Для обеспечения соответствия требованиям к составу и взаимосвязи оценочных средств и объективности оценивания результатов обучения и уровней сформированности компетенций по всему объему соответствия учебному плану направления подготовки из всех рабочих программ по каждой компетенции формируется список теоретических вопросов (практических задач).

Представленная модель позволяет сформировать основную профессиональную образовательную программу высшего образования для укрупненной группы специальностей/направлений, а также подготовить соответствующий фонд оценочных средств на основе ключевых принципов и равномерно распределить вопросы между дисциплинами, участвующими в формировании компетенций.

Список используемых источников

1. О мерах по реализации отдельных положений статьи 81 федерального закона от 29 декабря 2012 г. № 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации»: приказ Министра обороны Российской Федерации № 670 от 15 сентября 2014 года // Российская газета. – 2014. – Федеральный выпуск №6570 (298). – URL: <https://rg.ru/2014/12/30/minoborony-dok.html> (дата обращения: 31.01.2018).
2. *Чикуров В.А., Зиновьев В.Г., Мышко В.В.* Система оценивания уровня сформированности компетенций у слушателей и курсантов академии // Профессиональная компетентность преподавателя академии: информационный бюллетень. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2015. – Ч. 2, № 126. – С. 4–11.
3. *Кужекин Н.С., Чикуров В.А., Зиновьев С.В.* Фонд оценочных средств как компонент основной профессиональной образовательной программы // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2015. – Вып. 648. – С. 202–209.

В.П. Огородников,
доктор философских наук, профессор

ИНФОРМАЦИЯ, ИДЕОЛОГИЯ И ИСТИНА В СТРУКТУРЕ ИНФОРМАЦИОННОГО ПРОТИВОБОРСТВА

В публикации в контексте интерпретаций понятий «информация», «идеология», «истина» представлены основные характеристики и производится философско-социологический анализ феномена «информационное противоборство». Раскрываются основные составляющие такого противоборства в современных условиях. Показывается, что информационное противоборство неразрывно связано и с борьбой за истину в науке, и с экономико-политической борьбой. В связи с этим информационное противоборство включает в себя содержание понятий «информационная борьба» и «идеологическая борьба»

Ключевые слова: информация, идеология, информационное противоборство, научное познание, истина,

Современный мировой экономико-политический кризис стимулирует научные исследования по выяснению сущности и причин этого кризиса, путей выхода из него. Примечательно, что кризис разразился именно на этапе перехода развитых стран мира от индустриального производства к постиндустриальному – информационному. Многие специалисты в области экономики и философии весьма аргументированно показывают, что новейшие информационные технологии если не породили характеризующие мировой кризис современные глобальные проблемы, то во многом детерминировали их экспоненциальное развитие [1–3]. В частности, переход на новый качественный уровень получения, хранения и передачи информации стимулирует применение новейших вооружений, разработку новейших средств доставки ядерного оружия и систем ПРО (в том числе с использованием военно-космических систем), делает опасно эффективной деятельность мировых террористических организаций. Вступление человечества в эпоху «информационного общества» не решило ни экологических, ни демографических, ни ресурсных проблем, не освободило миллионы людей от нищеты и бесправия, голода и болезней. Мало того, информационное общество породило специфические глобальные проблемы, в том числе проблему информационного «перегрева». Все эти процессы приводят к усилению информационного противоборства в мире и разворачиваются на его фоне. Сказанное определяет актуальность и необходимость изучения истории и сущности феномена информационного противоборства.

Раскрытие заявленной весьма многоаспектной темы требует определения основных понятий, используемых в предлагаемой статье. Тем более, что интерпретации этих понятий настолько полисемичны, что вносят большую неопределенность не только в теорию, но и (что особенно опасно) в политическую практику.

Начнем с понятия «информация». Философское определение этого понятия предполагает три основных интерпретации. Первая предписывает информации атрибутивный характер – информация является атрибутом материального мира, процессы взаимодействия всех систем подразумевают обмен веществом, энергией и информацией. Налицо отождествление информации с отражением. Автор данной статьи, синтезируя известные подходы, предложил определить отражение как атрибутивное свойство материи, характеризующееся переносом части структуры (организации) одной системы в другую систему в процессе их взаимодействия [4]. Такое определение применимо ко всем известным современной науке взаимодействиям – от механического, с перенесением пространственной структуры, до взаимодействия понятий и суждений в процессе мышления. Однако мышление, представляя высшую форму отражения, не является атрибутом всего материального мира. Уже это отношение показывает, что нет основания отождествлять отражение и информацию. Так, перенос части пространственной

структуры камня в почву, на которой он лежит (лежал), не может быть охарактеризовано как процесс «информирования» даже в метафорическом смысле.

Второй вариант трактовки понятия «информация» сопоставляет это понятие с процессами функционирования живых и кибернетических систем. На ранних этапах развития биологии и физиологии формирование, хранение, перенос и использование информации в функционировании живого организма сопоставляли с ощущением, синтезом ощущений в восприятии и сохранении восприятия в виде представления в механизме памяти, имеющемся у всех живых существ – от одноклеточных до человека. Появление и развитие генетической науки было ознаменовано открытием генетической информации, реализуемой при экспрессии генов в процессах транскрипции (синтеза молекул РНК на матрице ДНК) и трансляции (синтеза белков на матрице РНК).

Наконец, третий вариант определения «информации» связывает информационный процесс исключительно с сознательной деятельностью человека, что представляет собой вариант антропоцентризма.

Нам представляется, что первый и третий варианты интерпретации информационных процессов являются метафизическими (антидиалектическими) крайностями, ведущими к ошибкам и заблуждениям. Опираясь на множество разработок, посвященных второму (в нашем случае) варианту истолкования сущности информации, можно дать следующее определение этого феномена: информация – это такой процесс отражения структуры одной системы в другой, который приводит (или служит основанием) к направленному изменению функционирования отражающей системы. Представляется, что именно такая дефиниция адекватна сущности информационных процессов, регулирующих жизнедеятельность как отдельного человека, так и социума. Определение учитывает связь информации с развитием как системой направленных изменений, вскрывает основания такой направленности. Из этого уточнения следует вывод, что информационные процессы – частный случай отражения, связанный с функционированием живых и кибернетических систем.

Определим теперь содержание понятия «идеология». Идеология является теоретической составляющей экономических, политических, философских, правовых, религиозных, этических, эстетических, естественных, общественных и прочих взглядов, принципов и убеждений. Идеология всегда связана с теоретизацией (не обязательно научной). Она представляет собой теоретический (в отличие от чувственно-эмоционального) уровень мировоззрения, на котором так или иначе осознаются и оцениваются природные и общественные процессы и взаимодействия природы и общества. В соответствии с той или иной идеологией определяются цели (программы) деятельности как любого социума, так и отдельного человека. Неправомерно, как это часто делается, сводить идеологию к ее политическому варианту. Многообразие идеологии реализуется в различных формах общественного сознания. Если общественное бытие определяет общественное сознание, то индивидуальное бытие, специфическим образом включенное в общественную жизнь, определяет специфичность и индивидуальность сознания личности.

Обыденный уровень идеологии опирается на обобщение данных личного опыта, обывательских взглядов, сведений, почерпнутых из СМИ и литературы. Так, у Ильи Ильфа и Евгения Петрова в «Золотом теленке» выведен образ почтенных стариков Черноморска, одетых в белые пикейные жилеты. Собравшись на своем любимом месте, они увлеченно обсуждали события международной политики, давали оценки известным государственным деятелям и дипломатам. Ясно, что предметом интеллектуальной деятельности «пикейных жилетов» была политическая идеология. Но их взгляды не имели научного основания в виде политической теории, обобщали лишённые систематизации, произвольно выбранные разрозненные факты. Всякая идеология обыденного уровня строится либо на «популярной» индукции (обобщения случайно выбранных из личного опыта или средств массовой информации фактов), либо на столь же популярной дедукции, представляющей собой процедуру выведения заключений из принятой на веру догмы. Примерами второго варианта является ориентация

большинства избирателей на партию, «раскрученную» средствами массовой информации как «истинно народную и демократическую» (обыденный уровень политической идеологии), погоня за модной одеждой, восхищение модными произведениями искусства (обыденный уровень эстетической идеологии), модными паранаучными взглядами на мир, общество и тому подобное.

Научный уровень идеологии характеризуется прежде всего использованием научной методологии (системный подход, связь научной индукции и дедукции, исторического и логического, диалектической логики и детерминизма и т.п.). «До этого уровня «дорастают» лишь отдельно взятые ученые-специалисты, объединенные в научные сообщества. Но и они не могут представлять единую систему научного мировоззрения, научной идеологии. Такая ситуация тысячелетиями является весьма благоприятной для всевозможных фальсификаций фактов. При этом, как и в юриспруденции, нужно отличать добровольное заблуждение от сознательной фальсификации истины, имеющей целью ввести в заблуждение большие группы людей, вооружить их друг против друга при помощи ложной идеологии» [6, с. 229].

Следует заметить, что парные понятия «научный уровень» и «обыденный уровень» в отношении идеологии отнюдь не совпадают с другой парой «истинная идеология» и «ложная идеология». Дело в том, что критерием истины выступает практика, а критерием научности – логичность построения теории. Так, геоцентрическая система Птолемея и гелиоцентрическая система Коперника безусловно относятся к научной идеологии потому, что обе логично построены. Однако истинной, что уже многократно подтверждено практикой, является гелиоцентрическая система.

Важно отметить, что «правда» и «ложь» – категории нравственные, а «истина» и «заблуждение» – гносеологические. Поэтому ложная идеология связана с преднамеренным искажением истины или того, что лжец считает истиной. В связи с этим ложь и истина сочетаются друг с другом самым причудливым образом. Можно нагло лгать, но при этом говорить или писать истину. Если, например, сегодняшний правоверный астролог (не перевелись еще такие), не сомневающийся в истинности геоцентрической системы, случайно попадет в компанию ученых-астрономов, то он, убоившись своих астрологических убеждений, может притворно согласиться с суждениями гелиоцентрической концепции. В этом случае он солжет, но выскажет истинное суждение. В информационно-идеологическом противоборстве в качестве оружия фигурируют суждения и «теории» ложной идеологии, хотя не исключается и добровольное заблуждение, срабатывающее вернее только потому, что пропагандирующий какую-либо вредоносную идею свято верит в нее как в истину.

Приведенные дефиниции позволяют уточнить соотношение рассматриваемых понятий. «Информация» является большим по объему понятием, чем «идеология» и подчиняет себе последнюю. То есть существует внеидеологическая информация, но не существует внеинформационной идеологии. Поэтому не всякое информационное противоборство является вместе с тем идеологическим, но всякое идеологическое противоборство опирается на информационное основание.

В связи с этим встает вопрос: можно ли идеологию признать оружием? Известно выражение К. Маркса: «Оружие критики не может, конечно, заменить критики оружием, материальная сила должна быть опрокинута материальной же силой, но теория становится материальной силой, как только она овладевает массами»[5]. Маркс указывает далее, что далеко не каждая идея может овладеть массами. Для достижения такого эффекта необходимо, чтобы идея соответствовала насущным чаяниям масс. При этом совсем не обязательно, чтобы эти чаяния отражали объективные реальные возможности и пути их реализации. В тридцатые годы XX века идеология фашизма овладела сначала населением Италии, Испании, а потом и одним из самых культурных и просвещенных народов тогдашней Европы – немцами. Десятки тысяч наследников Шиллера и Гете, Бетховена и Гегеля маршировали под фашистскими штандартами, до хрипоты кричали «Sieg Heil!» на стадионах, приветствуя своего фюрера. Идея стала мощной материальной силой, не созидательной, а разрушительной.

Практические последствия были диаметрально противоположны ожидаемым, определили ложность и вредность «руководящей» идеи.

Всякая информационная «атака», как часть информационно-идеологической борьбы, имеет целью подавление (вывод из строя) живой силы противника (его деморализацию), техники (включая и информационную), развал экономики, захват территории, ввод внешнего управления над страной. Внедрить чуждую противнику идеологию для подавления его сопротивления, умиротворения, примирения – важнейшая задача информационно-идеологической борьбы.

С другой стороны, не всякая информационно-идеологическая борьба является подготовкой «горячей» войны или одной из составляющих «холодной войны». В этом контексте информационно-идеологическая борьба – не всегда война. Особенно широко информационно-идеологическая борьба используется во внутригосударственной политике – пропаганда соответствующих определенной государственной политике религиозных взглядов (например, в исламских государствах), мистики, суеверий и ложных концепций развития общества (социал-дарвинизм, неотрейдизм, технологический детерминизм, географический детерминизм, многообразие объективно и субъективно идеалистических концепций общественного развития).

Информационная борьба не всегда является информационно-идеологической по своему содержанию. Так, деятельность по направленной генетической модификации растения, животного и даже человека связана с созданием рекомбинантной ДНК, которая несет в себе искусственно созданную человеком последовательность ДНК, то есть целенаправленно измененный информационный код, по которому будет воспроизводиться новый организм. Подобная деятельность может быть квалифицирована как информационная война в том случае, если она имеет целью причинить материальный или интеллектуальный вред военнослужащим или гражданским лицам государства-противника. Поскольку политические цели такой войны всегда идейно-теоретически обосновываются, она становится информационно-идеологической войной.

В информационно-идеологической войне всегда используется фальсифицированная идеология, распространяющаяся на самые разные области человеческого бытия – от экономической и политической до религиозной и даже этической и эстетической деятельности. Например, как можно охарактеризовать происходящее в XX и XXI веках наводнение вернисажей «художественными произведениями» представителей авангардистских и поставангардистских направлений изобразительного искусства – кубизма, футуризма, абстракционизма, дадаизма, супрематизма, минимализма, концептуализма и тому подобных? С одной стороны, это свидетельствует об углубляющемся декадансе, а с другой – может быть оценено как попытка (и не безуспешная) деформации мировоззрения и мировосприятия зрителей – то есть как форма информационно-идеологической борьбы.

Сказанное об информационно-идеологической борьбе ни в коем случае нельзя интерпретировать в духе субъективного идеализма – абсолютизации идеологической детерминанты социальных процессов как их причины. Причиной всех изменений и в природе, и в обществе являются объективные противоречия. Но при этом нельзя недооценивать роль субъективного фактора во всех социальных процессах, особенно поворотных.

Во все времена существования России экономическое и политическое единство суверенного государства подкреплялось национальной идеей, выполняющей роль духовного скрепа народа. Несколько столетий такой духовной скрепой, несомненно, было православие.

Русское воинство, движимое сознанием отстоять отечество и веру, часто одерживало победу над превосходящим по численности и вооружению врагом. Однако когда Россия стала могучей многонациональной державой, появилось много сторонников религиозного плюрализма. В 90-е годы прошлого века стараниями запада в сознание россиян внедрялась идея философского постмодерна: плюрализм – основа демократии (авторы идеи – К. Ясперс, К. Поппер и др.). Плюрализм как философская концепция постулирует равенство многооб-

разного в объективном мире и человеческом сознании. Полагается, что для любого явления существует несколько независимых друг от друга причин. К примеру, многими авторами причинами февральской революции 1917 года в России называются четыре стратегических просчета Николая II:

- 1) проведение столыпинской реформы, усугубившей аграрные противоречия;
- 2) осуществление принудительной русификации российских окраин, что углубило межнациональные конфликты;
- 3) отстранение Думы (по закону от 3 июня 1907 года) от назначения и контроля за министрами российской империи;
- 4) втягивание России в ненужную и опасную усугублением внутренних противоречий войну с Германией.

При этом настаивается, что все названные «причины» равнозначны, равнопорядковы и представляют лишь суммативную систему – конгломерат.

Стоит напомнить, что диалектический метод рассматривает всякую причину как борьбу противоположностей. В отношении революций это очевидная истина. Если мы не понимаем истинной причины чего-то, то не можем сознательно влиять на данный процесс. Полагаю, что именно такой эффект является скрытой целью (если это не заблуждение) идеологов плюрализма. Из сказанного становится ясно, что концепция плюрализма – одно из мощных средств ведения информационно-идеологической войны.

Дошло дело до того, что в новой, принятой в декабре 1993 года, Конституции России появилась статья 13, декларирующая плюрализм идеологии. В результате объединяющая национальная идея была во многом утрачена, что поддерживало и развивало сепаратистские настроения, чреватые распадом России.

Сегодня наше общество решительно расстается с плюралистическим подходом. Важнейшим субъективным основанием социального единства признано единство идеологическое. В связи с этим весьма важным является заявление Президента России В.В. Путина на встрече с активом «Клуба лидеров» (объединение предпринимателей из 40 российских регионов) 03.02.2016 года: «У нас нет никакой, и не может быть другой объединяющей идеи, кроме патриотизма... Это и есть национальная идея» [7].

Главным философским основанием большинства концепций, применяемых в информационно-идеологической борьбе, выступает идеализм. «Идеалистические трактовки истории элиминируют и саму историческую науку, лишая историю закономерности. При этом упраздняется и всякая закономерность человеческого бытия, распадается «связь времен». Объективно- и субъективно-идеалистический волюнтаризм, вполне логично вытекающий из подобных трактовок человеческой истории, делает невозможным, да и ненужным делом всякое научное познание. На этой базе процветают всевозможные фальсификации истории, упражняющиеся в кардинальном пересмотре и грубом искажении исторических фактов. Например, Владимир Резун, известный под псевдонимом Виктор Суворов, автор нашумевших книг «Ледокол» и «День «М», пытается в них полностью перевернуть причинно-следственные детерминанты, приведшие ко Второй мировой войне. В названных работах Резун стремится доказать, что Советский Союз – агрессор, он развязал Вторую мировую войну, стремился захватить Германию и всю Европу, а потом – и весь мир» [6, с. 234].

В рамках информационно-идеологической борьбы наши противники широко используют современные «наработки» паранауки и псевдонауки. При этом проводником подобной идеологии иногда выступают достаточно серьезные ученые – специалисты в областях знания, непосредственно не соприкасающихся с предметом рассмотрения. На деле подобные псевдонаучные «теории» наносят огромный вред и науке, и практике.

«Так, член-корреспондент Белорусской академии наук А.В. Вейник объяснял все «аномальные явления» – привидения, полтергейст, НЛО, ясновидение и т.п. «искривлениями пространства-времени». Автор не признанной научным сообществом теории термодинамики реальных процессов (ТРП) утверждал, что время и пространство являются самостоятельны-

ми субстратами, поддающимися внешнему управлению. Базируясь на этом постулате (никак научно не аргументированном) как истинном, Вейник заявил о несостоятельности второго закона термодинамики Клаузиуса, третьего закона механики Ньютона, закона сохранения количества движения, общей теории относительности и квантовой механики» [9].

Произведенный анализ структуры информационно-идеологического противоборства показал, что в нарочитом искажении научных взглядов на человека, общество, природу и их взаимодействие с давних времен и по настоящее время широко используются объективный и субъективный идеализм и антидиалектический подход к рассмотрению любых процессов и явлений. Это является основанием для фальсификации истины, направляет деятельность человека и общества по ложным путям, включая и разные формы противоборства с вероятным политическим противником. Данные соображения помогают понять важность использования в решении рассмотренной проблематики мировоззренческой и методологической функций диалектико-материалистической философии.

Список используемых источников

1. *Бодрунов С.Д.* Ноономика. Будущее: четвертая технологическая революция обуславливает необходимость глубоких изменений в экономической и социальной жизни // Форсайт «Россия»: новое индустриальное общество. Будущее: сборник пленарных докладов IV Санкт-Петербургского Международного экономического конгресса (СПЭК-2018). – СПб.: ИНИЗ, 2018. – Т.1.
2. *Гринберг Р.С.* Технологические революции и социум: мировой тренд и российская специфика // Экономическое возрождение России. – 2019. – № 1(59).
3. *Нигматулин Р.И.* Все мысли, которые имеют огромные последствия, всегда просты // Форсайт «Россия»: новое индустриальное общество. Будущее: сборник пленарных докладов IV Санкт-Петербургского Международного экономического конгресса (СПЭК- 2018). – СПб.: ИНИЗ, 2018. – Т.1.
4. *Огородников В.П., Ильин В.В.* Философия. – СПб.: ПГУПС, 2010. – С. 306–307.
5. *Маркс К.* К критике гегелевской философии права // Маркс К. и Энгельс Ф. Собр. соч. – 2-е. изд. – М.: Издательство политической литературы, 1955–1974. – Т. 1. – С. 422.
6. *Огородников В.П.* Роль преподавателя гуманитарных дисциплин военного вуза в условиях обострения информационно-идеологической войны // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2017. – Вып. 656. – С. 228–236.
7. Российская газета. – 2016. – № 6890 [4 февр.]. – С. 1.
8. *Тихоплавова В. и Т.* Физика веры. – СПб.: Весть, 2001.
9. *Огородников В.П.* Проблемы критерия истины и паранаука // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2016. – Вып. 654. – С. 216–225.

Е.М. Черкасова,
кандидат экономических наук, доцент

ОБОСНОВАНИЕ МЕХАНИЗМА УПРАВЛЕНИЯ ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ В ВОЕННЫХ ВУЗАХ РОССИИ

Публикация посвящена обоснованию механизма управления инновационной деятельностью в военных вузах РФ. Актуальность темы определяется установленной в стратегических документах России и Министерства обороны ориентацией на инновационный социально ориентированный тип развития. Отличительной особенностью механизма является то, что инновационная деятельность трактуется как деятельность по совершенствованию факторов производства, задействованных при осуществлении видов деятельности, прав и социальных гарантий обучающимся и персоналу, а система факторов производства трактуется как система институциональных факторов производства, обоснованная на базе структурно-функциональной теории Т. Парсонса. Механизм позволяет оперативно и согласованно внедрять нововведения разных видов.

Ключевые слова: военный вуз, инновационная деятельность, управление, механизм, Министерство обороны Российской Федерации.

Ускорение научно-технологического и социального прогресса и вызванная этим обстоятельством потребность в непрерывной модернизации Вооруженных сил России привели к расширению полномочий Министерства обороны, вменение ему деятельности по инновационному развитию в области обороны, сопровождению научно-технических и инновационных программ и проектов и созданию условий для их реализации [1]. Однако в настоящее время отмечается невосприимчивость экономики страны и Министерства обороны к инновациям, затрудненность внедрения изобретений, незначительные объемы передачи технологий между оборонным и гражданским секторами экономики, несогласованность приоритетов и инструментов поддержки научно-технологического развития на всех уровнях. Поэтому появилась потребность в формировании эффективной современной системы управления в области инноваций [2].

Важность рассматриваемой темы объясняется двумя обстоятельствами. Во-первых, потребностью проведения в условиях ускорения научно-технологического и социального прогресса оперативной модернизации образовательных организаций высшего профессионального образования МО РФ (военных вузов). Во-вторых, тем, что в военных вузах, как отдельной категории организаций Министерства обороны, наиболее ярко проявляются все издержки, несогласованность, диспропорции в управлении инновационной деятельностью в институте высшего военного образования и экономике страны в целом. Обоснование механизма управления инновационной деятельностью на уровне военного вуза создаст своеобразную матрицу для формирования эффективной современной системы управления инновационной деятельностью на всех уровнях экономики.

Причина современных проблем в управлении инновационной деятельностью в военных вузах заключается прежде всего в отрыве друг от друга нововведений различных видов: научно-технических, организационно-экономических и социально-культурных. В итоге организация воспринимает отдельное нововведение как нечто чуждое, а результат приносят только те, которые реализуются в рамках инновационных проектов, согласующих нововведения всех видов. Для оперативной реализации увеличивающегося количества инновационных проектов, инициируемых организациями вышестоящих органов управления и военными вузами при разработке современного механизма управления инновационной деятельностью, требуется учесть взаимосвязанность нововведений разных видов.

С позиции автора статьи инновационная деятельность в военных вузах – это деятельность по совершенствованию задействованных для производства услуг факторов производства,

приведение их в состояние, позволяющее удовлетворить современные потребности Министерства обороны, а также обеспечить права и социальные гарантии обучающихся и персонала. В этой связи при разработке современного механизма управления инновационной деятельностью в военных вузах целесообразно опираться на современное научное понимание сущности и предмета инновационной деятельности, а также видов деятельности военных вузов, определяющих ее направления.

Зачастую в экономической литературе сущность инновационной деятельности трактуется как процесс создания и внедрения нововведений. Такая трактовка смешивает понятия знания и нововведения, а также не позволяет учесть сопровождающие внедрение новшества затраты на утилизацию. Современная трактовка сущности инновационной деятельности в военных вузах, по мнению автора, должна исходить из понимания ее нацеленности на повышение качества услуг путем обновления процесса их производства. В процессе производства услуг используются факторы производства, которые и обновляются в ходе инновационной деятельности. Сущность инновационной деятельности заключается в утилизации устаревших элементов факторов производства и внедрение актуальных. Факторы производства выступают исходя из приведенной логики предметом инновационной деятельности в военных вузах.

Взаимосвязанность нововведений разных видов подтверждается взаимосвязанностью факторов производства как переменных производственной функции. Совершенствование того или иного фактора производства представляет собой нововведение того или иного вида. От полноты и замкнутости системы факторов производства зависит эффективность разрабатываемого механизма. Если какой-то фактор производства оказывается не включенным в систему, то это приводит к росту транзакционных издержек.

Обоснование современной системы факторов производства в экономической науке, как показали исследования, является дискуссионной сферой. На ее обсуждение нацелены неоклассическая экономическая теория, институциональная теория фирмы, системно-интеграционные теории факторов производства. Пока экономической науке не удалось обосновать полную и замкнутую систему факторов производства, выделенных по единому признаку. Исследование других сфер научного знания для решения научной проблемы позволило выявить социологическую структурно-функциональную теорию Т. Парсонса, предлагающую не противоречащую разработкам различных теорий, замкнутую систему структурных компонентов института – коллектив, ценности, нормы, роли, выполняющих соответственно функции целедостижения, воспроизводства, интеграции и адаптации персонала [3]. Структурно-функциональная теория подходит для становления современных факторов производства как институциональных факторов производства при обосновании механизма управления инновационной деятельностью в военных вузах, поскольку военный вуз, как и институт – это целевая общность [4]. Также функции институциональных факторов производства удачно сочетаются с функциями работников разных категорий военных вузов, делают их более четкими, связывают работников в едином процессе производства услуг. Целевые работники (научно-педагогические, научные, военные) непосредственно достигают конечной цели услуги, вспомогательные работники (инженерно-технические, методические, административно-управленческие) обеспечивают достижение цели. Инженерно-технические работники осуществляют материально-техническое обеспечение, административно-управленческие работники – нормативное обеспечение, методические работники – методическое обеспечение.

Инновационная деятельность в военных вузах вызывается изменением потребностей Министерства обороны по видам предоставляемых ими услуг (видов деятельности) и направлениям обеспечения прав и социальных гарантий обучающимся и персоналу. Виды деятельности, права и социальные гарантии обучающимся и персоналу установлены Приказом МО № 670, федеральными законами «Об образовании в РФ», «О статусе военнослужащих», Трудовым кодексом РФ и другими нормативными актами. Анализ задач и видов деятельности, установленных Приказом МО № 670 [5], сопоставление их с Общероссийским

классификатором видов экономической деятельности (ОКВЭД) [6] позволили установить противоречия в выделении видов деятельности военного вуза и предложить более корректный их перечень: образование (раздел Р, ОКВЭД 85), научные исследования и разработки (раздел М, ОКВЭД 72), обеспечение военной безопасности (раздел О, ОКВЭД 84.). Упрощенно виды деятельности предлагается именовать как образовательную, научную и военную.

Предлагаемый перечень видов деятельности отличается от перечня, установленного Приказом № 670, тем, что из него исключена методическая и воспитательная и добавлена военная деятельность. Исходя из уточненных функций работников разных категорий, обеспечивающих предоставление услуг военных вузов, следует, что методическая и воспитательная деятельности являются вспомогательными при осуществлении основных видов деятельности. Они обеспечивают адаптацию персонала и обучающихся к процессу осуществления основных видов деятельности. Методическая и воспитательная деятельности выступают в виде учебно-методической работы и воспитания стремления у обучающихся к лучшему овладению знаниями, или научно-методической работы и воспитания стремления у обучающихся к поиску новых знаний, или военно-методической работы и воспитания патриотизма у обучающихся. Военная деятельность добавлена в перечень видов деятельности, поскольку в военном вузе осуществляется деятельность, целью которой является обеспечение военной безопасности, и эта цель обособлена от целей образовательной деятельности – переработка и передача знания, научной деятельности – получение нового знания.

Теоретическое обоснование сущности инновационной деятельности, современной системы факторов производства и видов деятельности, определяющих ее направления, позволяет разработать содержание функций управления инновационной деятельностью в военных вузах, включающих ее планирование, организацию, координацию, мотивацию и контроль.

Планирование инновационной деятельности в военном вузе подразумевает выбор инновационной стратегии, установление ее целевых показателей и оценку затрат. Целевые показатели отражают улучшение качества задействованных факторов производства в ходе инновационной деятельности работников военных вузов, приводящее к повышению качества услуг. Улучшение качества услуг должно учитываться при расчете их стоимости. В настоящее время в методике Минобрнауки учет качества предоставляемых услуг осуществляется при помощи отраслевых корректирующих коэффициентов [7]. При расчете нормативной стоимости услуги базовая нормативная стоимость услуги умножается на отраслевые коэффициенты. Однако в современной трактовке отраслевые коэффициенты опираются на престижность вуза, его доходность и публикационную активность персонала в изданиях Web of Science и Scopus и не могут быть применены для оценки качества услуг военных вузов в силу их специфики.

В рамках проводимого обоснования механизма управления инновационной деятельностью целесообразно отраслевой коэффициент $K_{отр}$ связать с приращением обеспеченности услуги качественными институциональными факторами производства, произведенным работниками военного вуза:

$$K_{отр} = K_{П} \times K_{Д} \times K_{М} \times K_{Н},$$

где $K_{П}$ – коэффициент профессиональной квалификации работников;

$K_{Д}$ – коэффициент должностной адаптации работников;

$K_{М}$ – коэффициент обеспеченности услуги современными материально-техническими ресурсами;

$K_{Н}$ – коэффициент обеспеченности услуги актуальными нормативными документами.

Отраслевой коэффициент образует надбавку к стоимости услуг за качество. Эта надбавка может быть распределена между работниками в качестве стимулирующей надбавки за результаты инновационной деятельности.

Организация инновационной деятельности в военном вузе должна опираться на организационную структуру управления, определяющую взаимосвязи между функциональными подразделениями, обеспечивающими производство услуг факторами производства, и процессными подразделениями, использующими факторы производства при производстве услуг. К функциональным подразделениям, из существующих в настоящее время подразделений, можно отнести отдел по организации научной работы, учебно-методический отдел, отдел кадров, отдел военно-научной информации, бюро по изобретательству, финансово-экономический отдел, отдел материально-технического обеспечения, строевой отдел, отдел по воспитательной работе. В соответствии с представлением об институциональных факторах производства функциональные подразделения могут быть систематизированы по их функциям: нормативное обеспечение, кадровое обеспечение, материально-техническое обеспечение, обеспечение адаптации персонала. К процессным подразделениям можно отнести подразделения, осуществляющие образовательную, научную и военную виды деятельности: факультеты, общеакадемические кафедры, лаборатории, научно-исследовательские институты. Они могут быть универсальными (осуществляющими несколько видов деятельности) и специфическими (осуществляющими один вид деятельности).

В военных вузах предлагается взять за основу организационной структуры управления матричную структуру (рис. 1).



Рис. 1. Организационная структура управления военного вуза (разраб. авт.)

Особую направленность среди подразделений военного вуза имеют клуб, музей, госпиталь, типография, библиотека, факультет переподготовки и повышения квалификации научно-педагогического состава и другие аналогичные подразделения. Они обеспечивают реализацию прав и социальных гарантий обучающимся и персоналу при осуществлении того или иного вида деятельности. В частности, право на пользование библиотечно-информационными ресурсами, лечебно-оздоровительной инфраструктурой, объектами культуры и спорта, на обеспечение одеждой, обувью, жестким и мягким инвентарем, питанием, жилыми помещениями в общежитиях, денежными выплатами, право на объединение в общественные профессиональные организации, право на дополнительное

профессиональное образование по профилю педагогической деятельности не реже чем один раз в три года и другие права и социальные гарантии [8]. Права и социальные гарантии дополняют требования к используемым факторам производства и обеспечиваются организациями вышестоящих уровней. Так, право на дополнительное профессиональное образование по профилю педагогической деятельности дополняет кадровое обеспечение образовательной деятельности квалифицированным персоналом. Для обеспечения этого права в военных вузах создаются факультеты переподготовки и повышения квалификации научно-педагогического состава. В связи с общностью целей целесообразно включать подразделения, обеспечивающие права и социальные гарантии обучающимся и персоналу, в состав родственных для них функциональных подразделений.

Инновационная деятельность – это совершенствование институциональных факторов производства. Задача по организации и управлению ею должна ставиться в этой связи перед функциональными подразделениями, обеспечивающими процессные подразделения соответствующими институциональными факторами производства. Отдельных подразделений для обеспечения инновационной деятельности не требуется. Например, Бюро по изобретательству, осуществляющее сегодня управление изобретательской, рационализаторской и патентно-лицензионной работой, т.е. работой по совершенствованию материально-технической базы военного вуза, должно работать в составе блока функциональных подразделений, выполняющих материально-техническое обеспечения. В современных условиях включение Бюро в Отдел по организации научной работы формирует противоречие по целям. Целью Отдела является организация процесса создания нового знания. При включении же Бюро по изобретательству в состав подразделений материально-технического обеспечения возникают каналы внедрения создаваемых объектов интеллектуальной собственности в военном вузе с последующим включением их в состав нематериальных активов, а также заказчиком НИР и др.

Результативность механизма управления инновационной деятельностью определяется качеством координации нововведений между функциональными подразделениями [горизонтальная] и между функциональными и процессными подразделениями [вертикальная] (рис. 2).

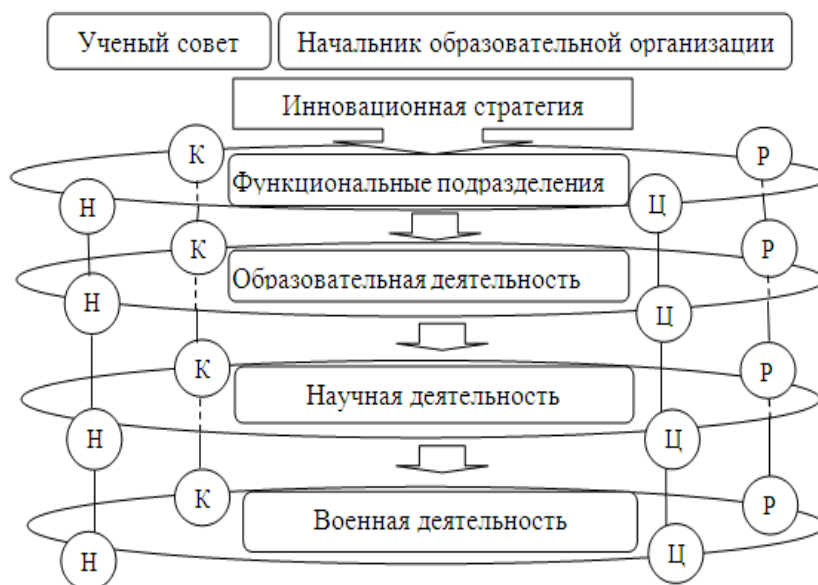


Рис. 2. Координация инновационной деятельности в военном вузе (разраб. авт.)

В соответствии с рис. 2 инновационная стратегия военного вуза формулируется на заседаниях Ученого совета. Основное руководство претворением в жизнь этой стратегии ложится на функциональные подразделения, разделенные на четыре группы, каждая из которых снабжает тем или иным институциональным фактором производства нормы, коллектив, роли, ценности (на рис. 2 они обозначены буквами Н, К, Р, Ц). Горизонтальная координация нововведений на уровне функциональных подразделений позволяет автоматически согласовать их и в процессных подразделениях.

Мотивация и контроль инновационной деятельности в военном вузе должны опираться на показатели, описывающие вклад работников в совершенствование институциональных факторов производства, задействованных для осуществления видов деятельности и направлений обеспечения прав и социальных гарантий обучающимся и персоналу. В совершенствовании институциональных факторов производства принимают участие работники всех категорий. Вклад работников может выражаться в повышении собственной квалификации, разработке методических материалов, нормативных документов, рационализаторских предложений, публикаций, участии в конференциях, военных учениях, подготовке библиотечных выставок и прочего и устанавливается путем анкетирования.

Результативность инновационной деятельности i -го работника военного вуза рассчитывается по формуле

$$W_i = \sum_{n=1}^M W_{in},$$

где W_{in} – результативность i -го работника по совершенствованию n -го фактора;
 M – количество институциональных факторов производства.

Доля работника D_i в фонде стимулирующих выплат рассчитывается по формуле

$$D_i = \frac{W_i}{\sum_{i=0}^N W_i},$$

где W_i – результативность инновационной деятельности i -го работника;
 $\sum_{i=0}^N W_i$ – результативность инновационной деятельности всех работников военного вуза.

Величина стимулирующей надбавки за результаты инновационной деятельности i -го работника S_i рассчитывается по формуле

$$S_i = D_i \times S,$$

где S – фонд стимулирующих выплат за результаты инновационной деятельности военного вуза.

Контроль инновационной деятельности в военных вузах может производиться путем расчета ее результативности $\mathcal{E}_{\text{факт}}$, которая определяется из соотношения ее результата W с затратами C :

$$\mathcal{E}_{\text{факт}} = \frac{W}{C}.$$

Результат инновационной деятельности военного вуза W – это сумма результатов инновационной деятельности его отдельных работников.

Затраты инновационной деятельности C в общем виде складываются из затрат на обновление институциональных факторов производства по видам деятельности и направлениям обеспечения прав и социальных гарантий обучающимся и персоналу:

$$C = \sum_{k=1}^B \sum_{j=1}^K (C_{kj}^I + C_{kj}^{II}),$$

- где C_{kj}^I – затраты на утилизацию j -го фактора по k -му виду деятельности, направлению обеспечения прав и социальных гарантий обучающимся и персоналу;
 C_{kj}^{II} – затраты на разработку j -го фактора по k -му виду деятельности, направлению обеспечения прав и социальных гарантий обучающимся и персоналу;
 B – количество видов деятельности, направлений обеспечения прав и социальных гарантий;
 K – количество институциональных факторов производства.

Также на основе оценки результата инновационной деятельности военного вуза можно рассчитать производительность труда. Для этого достигнутый военным вузом результат инновационной деятельности W делится на количество работников военного вуза N .

Итак, путем решения ряда экономических проблем, заключающихся в обосновании институциональных факторов производства как предмета инновационной деятельности, сущности и затрат инновационной деятельности, обоснован механизм управления инновационной деятельностью в военных вузах РФ, отличающийся тем, что он позволяет:

- согласованно внедрять нововведения разных видов, отражающие совершенствование институциональных факторов производства;
- учесть результат инновационной деятельности по видам деятельности (образовательная, научная и военная) и направлениям обеспечения прав и социальных гарантий обучающимся и персоналу;
- встроить управление инновационной деятельностью в структуру управления вуза;
- установить подразделения, организующие инновационную деятельность;
- оценить надбавку к базовой нормативной стоимости услуг военного вуза за качество;
- оценить вклад работников всех категорий в инновационную деятельность военного вуза;
- оценить результативность инновационной деятельности военных вузов.

Список используемых источников

1. О внесении изменения в Положение о Министерстве обороны Российской Федерации, утвержденное Указом Президента Российской Федерации от 16.08.2004 г. № 1082: указ Президента РФ № 540 от 14.11.2017. – URL:http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_282651 (дата обращения: 20.06.2019).
2. О стратегии научно-технологического развития Российской Федерации: указ Президента РФ № 642 от 01.12.2016. – URL:http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_207967 (дата обращения: 20.06.2019).
3. Парсонс Т. Системы современных обществ. – М.: Аспект Пресс, 1997. – 270 с.
4. Черкасова Е.М. Институциональные факторы производства // Проблемы современной экономики. – 2017. – № 4 (64).
5. О мерах по реализации отдельных положений статьи 81 федерального закона от 29 декабря 2012 г. № 273-ФЗ "Об образовании в Российской Федерации": приказ Министра обороны РФ от 15.09.2014 № 670 (ред. от 18.01.2016). – URL:http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_170951 (дата обращения: 20.06.2019).

6. Общероссийский классификатор видов экономической деятельности: приказ Росстандарта № 14-ст от 31.01.2014. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_163268 (дата обращения: 20.06.2019).

7. Методика определения нормативных затрат на оказание государственных услуг по реализации образовательных программ высшего образования по специальностям (направлениям подготовки) и укрупненным группам специальностей (направлений подготовки): приказ Министерства образования и науки РФ № 1272 от 30.10.2015 г. – URL: <https://base.garant.ru/71265064> (дата обращения: 20.06.2019).

8. Об образовании в Российской Федерации: федеральный закон № 273 от 29.12.2012 (ред. от 31.12.2014). – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_140174 (дата обращения: 20.06.2019).

Avksentiev A.A., Ivanov A.A., Ivanov A.O. Simulation of trajectory measurement processing based on a sequential smoothing algorithm // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 671. – P. 8–14.

The article proposes one of the variants of a sequential smoothing algorithm for measurements that implements the Kalman filtering procedure. The application program developed by the authors is presented for modeling measurements of the observed parameter and their subsequent processing.

Key words: monitoring object, measured parameter, Kalman filter.

Basyrov A.G., Kazancev D.I., Shushakov A.O. The Model of Complex Automation Devices Functioning Based on Virtualization of Computing Recourses Taking Into Account the Characteristics of Workload. // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 671. – P. 15–25.

In article considered functioning of network complex automation devices based on recourses virtualization witch processing data of Earth remote sensing from spacecraft's. Simulation of functioning computing systems in the condition of visualization is carried out.

The suggestion for improving effectiveness of functional-distributed data processing was formed. Given an example of applying the model for calculation of complex indicator of computer system functioning effectiveness.

Key words: special complex of automation devices, virtual machine, configuration of virtual environment.

Zakutaev A.A., Ivanov A.O., Oleynikov M.I. The mathematical model of near-earth space observation by means of low-orbit spacecraft with multispectral optoelectronic equipment // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 671. – P. 26–32.

The analysis of space objects observation conditions and condition for visible and infrared bands by means of low-orbit spacecraft's optoelectronic equipment performed in the paper. Additionally, analysis of ways of observation conditions accounting are considered. The mathematical model of near-earth space control by means of low-orbit spacecraft with multispectral optoelectronic equipment, taking into account the priority of observation options are developed.

Key words: spacecraft, multispectral optoelectronic equipment, observation performance.

Kalyuzhnyi A.V., Maksimov V.A., Shushakov A.O. Model of Onboard Heterogeneous Data Storage System Function with the Consideration of Different Information Importance // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 671. – P. 33–40.

The model of functioning of heterogeneous onboard data storage system of the earth remote sensing spacecraft is presented. The model takes into account the heterogeneity of the structure of stored data on information importance. The model includes relationships to determine the values of fault tolerance, efficiency and resource-intensive operation of the storage system.

The model can be used to analyze different variants of the structure and methods of data storage at the stage of construction and application of heterogeneous storage systems. Modeling of the performance of the storage system based on decomposition of the information processes functioning of the system, relationships between them, and dependencies of the values of particular indicators of quality of functioning of the storage system from its structure, methods of storage and condition.

Key words: data storage system, fault-tolerance, probability of data loss, Earth remote sensing satellites.

Malugin A.V., Pilipenko L.V., Khlebnikov S.G. Synthesis of the rational structure of a test crew for the measuring complex of a testing site // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 671. – P. 41–49.

The article presents a method for obtaining a rational structure of test calculations of the measuring complex of the testing site. To justify the composition of training groups for test crew of the measuring complex of the testing site, the method of integer linear programming is used. The coefficients of the objective function are the levels of preparedness of the operator for a specific measuring tool of the testing site.

Key words: structural synthesis, linear programming, rational composition, test crew, level of preparedness, measuring tool.

Method of planning the use of satellite radiocontrol system by based on rational disturbing its resources / A.A. Masalkin, A.N. Pavlov, E.M. Khalikov, I.V. Chaschin // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 671. – P. 50–59.

An approach to improving efficiency of the satellite radiomonitoring system is proposed. Subject of research are methods of planning of these systems application.

Existing methods of solving the planning problem of the satellite radiomonitoring system are based on the use of flexible approach which provides greater service of the territory with high population density and less service of the territory with low population density. This approach has a number of disadvantages, including the inability to take in account the density of the vehicles placement in geostationary orbit and impossibility of accounting for the simultaneous monitoring of the spacecraft transponders by several stations.

Method of application planning of satellite radiomonitoring system is proposed to eliminate these shortcomings. This method is based on solving the problem of discrete programming. An indicator of the quality of satellite radiomonitoring system planning is the number of serviced channels. The problem is complicated by the fact that the objective function is a non-linear function which makes impossible to use classical methods of mathematical programming to solve it. Method of linearization of function with boolean variables is proposed to solve this complexity. This method is based on the introduction of additional variables.

The essence of the method is to carry out an iterative procedure for solving the problem of discrete programming, followed by refinement of the objective function.

Computational experiments are conducted using this method. The obtained results prove the principal possibility of increasing the effectiveness of the satellite radiomonitoring system by 15–30% by eliminating duplication of channels.

Key words: satellite radiocontrol, planning methods, radioenvironment.

Khabarov R.S. Method for optimizing mixed priorities assignment in queuing network with multiservice nodes // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 671. – P. 60–70.

A method for optimizing mixed priorities assignment in a nonexponential queueing network (QN) is presented. It is assumed that QN in general has multiservice nodes with different service time distributions between classes. Calculation of the network nodes time characteristics is based on the idea of invariant relations, which consists in applying a symbolic proportion between the indicators of network nodes. A software implementation of the proposed method has been created.

Key words: queuing networks, optimization of queuing networks, multiservice systems, priority service, mixed priorities, relationship invariants.

Abakumov A.N., Ereemeev I.Y., Kadukov E.P. Model of the continuous phase modulation radio signals in the foreign satellite communication systems in the parameter space of the phase diagram // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 671. – P. 71–79.

The article considered a questions of the construction a model of radio signals with continuous phase modulation in foreign satellite communication systems based on the classification of the phase diagrams parameters. The conditions under which the required accuracy of estimates of the

parameters of phase diagrams is achieved are considered, and as a result, the reliability of recognition of signal classes is ensured.

Key words: continuous phase modulation radio signals, phase diagrams.

Aleshkin A.P., Zubarev K.K., Makarov A.A. The use of mobile radio interferometry in the task of coordinate-time support of remote consumers // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 671. – P. 80–90.

Comparative analysis of methods of determining the coordinates of the stationary point of the receiving system of universal time based on measurements of the navigation receiver signals of global navigation satellite system GLONASS and on the observations of the radiation of quasars in a small radiointerferometric complexes with a long base. The use of long-baseline radio telescopes allows to increase the stability of the coordinate-time and navigation support consumers, as fixed radiation sources of natural origin. We propose an approach that focuses on an unconventional use of means of long-baseline radiointerferometry in order of precision positioning remote telescope. The proposal may be useful for solving special problems of coordinate-time and navigation support, and, in particular, precision positioning of the remote receiving point of the system a single time. The natural character of the recorded radiation increases the resistance of navigation definitions in the standard problem, and provides alternative positioning of the consumer. Possible to navigation definition in the mode of integration of independent sources of navigation information (small radiointerferometric complexes with a long base and a global navigation satellite system). Contains accuracy of positioning characteristics when using standard navigation equipment GLONASS receiving system of universal time and small radiointerferometric complex with a long base, obtained according to simulation modeling.

Key words: GLONASS, GPS, VLBI, positioning, MNK, syc.

Aleshkin A.P., Vladimirov V.V., Savochkin P.V. Methodology for estimating the influence of characteristics of an other horizontal radar station on the effectiveness of detecting a ground target on the background of the underground surface // Proceedings of the Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 671. – P. 91–97.

A technique is presented for assessing the influence of the characteristics of an over-the-horizon radar station and a numerical example of calculating the signal-to-noise ratio in the radar channel for observing located objects against the background of the underlying surface. The analysis of the dependence of the signal-to-noise ratio characteristic on the relevant input parameters is carried out. Based on the analysis of the results obtained, a conclusion was drawn about the possibility of achieving the required signal-to-noise ratio values by narrowing the antenna radiation pattern, which determines the area of the field of view of an over-the-horizon radar station.

Key words: radar, signal / interference ratio, width of the directional diagram, width of the field of view, area of the underlying surface, effective area of scattering.

Bakursky K.V., Myslivtsev T.O., Tsykunov V.N. Estimation of intervals of observation of sources of natural space radio emission on Board the spacecraft // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 671. – P. 98–102.

To increase the autonomy of the time-frequency support of navigation spacecraft of the global navigation satellite system GLONASS, it is proposed to use signals from sources of natural space radio emission.

The estimation of intervals of observation of sources of natural space radio emission at different altitudes above sea level and in near-earth space, for formation of an Autonomous onboard time scale of the spacecraft is given.

Key word: on-Board timeline, source of natural cosmic radio emission.

Bulekbaev D.A., Likhachev V.M., Prodanetz V.A. Diffraction of electromagnetic waves by radio-lucent wedge-shaped bodies in problems of applied electrodynamics and radiolocation // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 671. – P. 103–113.

Theoretical foundations of the formation of exact solutions for the diffraction of a plane electromagnetic wave by a uniform radio-transparent (dielectric) wedge with semi-infinite edges. The determined solution is the boundary problem of the mathematical theory of diffraction with the necessary polarization of the excited electromagnetic fields in the quasi-optical frequency range.

The article considers: setting of the problem and a method of reducing it to a system of functional equations for some functions of a complex variable, meromorphic in some bands, with the intended substitution of the found meromorphic functions into the corresponding integrals and obtaining solutions of the stated diffraction problem in the outer and inner wedge-shaped areas.

Key words: diffraction, radio-transparent, dielectric, quasi-optical range, plane wave, meromorphic functions, functional equations, Sommerfeld integrals.

Buchinskiy D.I., Parshutkin A.V. Model of the impact of non-stationary interference on personal synchronization satellite communication // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 671. – P. 114–119.

The article is devoted to the issues of modeling the impact of unintended unsteady interference on personnel synchronization in modern broadband data transfer protocols of satellite communication systems. A description of the model of the impact of non-stationary consistent in frequency and width of the interference spectrum on the frame synchronization subsystem of satellite communication systems receivers is presented. The aim of the work is to study the effect of unintended cross-talk of coordinated spectrum and carrier frequency on the frame synchronization subsystem of the receiver of a broadband satellite communication system.

Key words: frame synchronization, data transfer protocol, adaptive protocols, noise immunity, satellite communication systems, non-stationary interference.

Buchinskiy D.I., Voznyuk V.V., Fomin A.V. Research of noise stability of the receiver with M-PSK modulation under the influence of interference with different structure // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 671. – P. 120–127.

In article is consider research of the effect of inadvertent hindrance interference on the digital channel of information transmission with M-PSK modulation. Estimated noise stability of M-PSK receiver.

Key words: noise stability, M-PSK modulation, inadvertent hindrance.

Likhachev V.M. Diffraction of electromagnetic surface waves by impedance wedge-shaped bodies in problems of radar and radio communications // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 671. – P. 128–139.

Theoretical foundations of creation of asymptotic solution of the cylindrical electromagnetic waves diffraction objective on impedance wedge-shaped structures in quasi-optical frequency range are represented in the article. Special attention is given to the formation of the surface waves field: primary, excited on impedance periods directly by the source and edge of the wedge, and secondary surface waves of various types, excited on the impedance periods by the edge of the wedge during diffraction on it of the primary surface wave.

Computational algorithms affording to take into account the effect of the incident electromagnetic field of electromagnetic waves on the radiophysical characteristics of surface waves excited on the impedance edges of the considered wedge-shaped structures are built in the article.

Key words: diffraction, surface wave, impedance wedge, asymptotic solution, cylindrical wave, quasi-optical range, diffraction coefficient, phase term.

Nikitin G.V., Staritsin S.S., Shishkalov A.V. Model of the formation of protocol units with packet multiplexing of senders voice data // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 671. – P. 140–150.

The article describes the procedure for the formation of application-level protocol blocks with the multiplexing of voice data transmitted over the channels of satellite communication systems with packet switching. A model of application-level protocol blocks with multiplexing voice data of subscribers has been developed, taking into account the change in the speech coding rate during the transmission of a voice message, the dynamic placement of speech frames and frames with comfort noise parameters in the structure of the protocol data block. Assessed and compared the required bandwidth of the communication channel when transmitting voice data using the protocol with packet multiplexing of voice data based on the developed model and the RTP protocol.

Key words: voice data multiplexing, voice data protocols.

Kotskovich A.V., Surzhikov V.F. Assessment of the possibility of navigational determination of spacecrafts movement parameters when flying to the moon using global navigation system // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 671. – P. 151–157.

The model of the movement of the spacecraft in a system Earth Moon is considered. The equations of the movement spacecraft in the rotating system of coordinates concerning a barycentre Earth Moon are removed. The scheme of flight of spacecraft is provided to the Moon. The assessment of a possibility of navigation determination of parameters of the movement S when flying to the Moon by means of global navigation systems GPS, GLONASS, Galileo, BEIDOU is carried out.

Key words: research of the Moon, spacecraft, navigation satellite systems, orbital group, radio visibility zones, system of navigation of spacecrafts.

Doronin A.P., Novikov A.V., Tymoshchuk A.S. The issues of establishing a network of environmental monitoring of the Department of Defence of the Russian Federation // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 671. – P. 158–162.

According to the order of the Department of Defence of the Russian Federation of September 14, 2015 № 530 «About the statement of Regulations on bodies of ecological safety of Armed Forces of the Russian Federation» one of tasks of service (ecological safety) is the organization and implementation of ecological monitoring and ecological control of parameters of environment. However, currently in the service (environmental safety) of the Armed forces of the Russian Federation there are no required technical means, observation posts, staff, information channels, funding to fully perform this task. In this regard, the task of optimizing the required number of technical means of environmental monitoring of military facilities, creating an effective departmental monitoring network, obtaining reliable, timely and complete information about the state of the environment at the facilities of the Department of defense is very urgent.

Key words: ecological monitoring, service (ecological safety), technical means, environment, departmental network of ecological monitoring.

Doronin A.P., Kozlova N.A., Petrochenko V.M. Estimations of suitability of the supercooled cloudiness to dissipation over the central area of the european territory of russia to solve of applied tasks // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 671. – P. 163–171.

On the basis of processing of materials of aircraft sounding of the atmosphere over Moscow quantitative estimations of suitability of the supercooled undulatus, stratiform and convective clouds to dissipation over the Central region of the European territory of Russia are given. The obtained data can be used in planning, preparation and implementation of actions on impact on clouds of the specified forms for the purpose of dissipation of a cloud cover for the purpose to solve of a wide range of applied tasks.

Key words: supercooled undulatus, stratiform and convective clouds, clouds, impact (modification), suitability of clouds for dissipation.

Assessment of opportunities of complexes of passive radio monitoring for detection and determination of coordinates of the air targets, irradiated by signals of a pulse radar stations / Y.N. Mamayev, I.V. Miloserdov, L.A. Ovcharenko, A.P. Sarkisyan // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 671. – P. 172–181.

The method of detection and geolocation of air targets by complexes of passive radio monitoring on the rereflected signals of the radar stations of land or air basing irradiating them is presented in article. In qualities of a prototype of a complex of passive radio monitoring the «Avtobaza – M» complex is used, and as sources of «sublight» the radar station of planes of distant radar detection and land airfield radar complexes are considered.

Calculation of sizes and forms of zones of alleged detection of air targets for compliance of such parameters of a complex of passive radio monitoring as sensitivity and dynamic range of reception of the reflected signals is carried out. As a source of «sublight» when calculating characteristics of radar station of planes of distant radar detection like «Avaks» were considered.

Results of an experiment on detection and geolocation of the air not radiating targets by the system of passive radio monitoring when using «sublight» of land airfield radar station are presented in article.

Key words: geolocation, passive complex of radio monitoring, third-party source of «sublight», pulse radar station of active sensing.

Nikitin G.V., Shishkalov A.V. Decomposition method of protocol blocks with package multiplexing of senders voice data // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 671. – P. 182–191.

The article describes a method that allows decomposition of protocol units with packet multiplexing of voice data of subscribers transmitted in group digital streams of satellite communication systems with packet switching. The method is based on the detection and evaluation of the parameters of the “length identifier” field in the absence of a description of the structure of protocol blocks with speech data due to the correlation between the values of the binary combination in the field and the segment size of the protocol block with speech data.

Key words: voice data multiplexing, voice transmission protocols, decomposition of protocol data units.

Chernov I.V. Substantiation of the method for determining the instrument correction of the gyrotheodolite with a given accuracy // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 671. – P. 192–200.

This article presents an approach to justify the accuracy of the initial geodetic basis for performing standardization of gyrotheodolites, the number of launches and methods of geodetic reference performed by them. An example of a method for determining the instrument correction of a gyrotheodolite with a given accuracy for a gyrotheodolite with a laser gyroscope as a sensitive element is given. The initial data for the justification of the methodology are the requirements for the accuracy of obtaining azimuths of directions, which allows us to approach the justification of the requirements for determining the instrumental correction of the gyrotheodolite from the position of provid-

ing a given orientation result, and therefore from the point of view of increasing the efficiency of gyroscopic orientation.

Key word: gyrotheodolite, laser, instrument correction, preset accuracy

Methodology for planning material and technical support for military units of space troops taking into account price instability / N.I. Alimov, V.A. Vlasov, N.V. Radionov, E.K. Yahvarov // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 671. – P. 201–209.

The article discusses the strategy of economically active formation of plans for material and technical support of HF with material and technical means on contractual terms. Two variants of the statement of the problem of choosing the option of organizing the material and technical supply of HF are formulated. A modification of the problem of choosing the option of organizing the material and technical supply of HF is proposed, associated with simplified rational methods for solving mixed discrete-continuous programming problems.

Key words: material and technical means, technically useful strategies, investment strategies, method of economic analogue, efficiency standard.

Averkiev N.F., Kulvic A.V., Khasanov A.Y. The definition of probability of spacecraft collision during their group breeding // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MMA, 2019. – Release 671. – P. 210–217.

The possibility of spacecrafts collision during their group launch into orbit is investigated and corresponding probabilities are calculated. Dependences of probability of spacecrafts collision on reference orbit parameters which spacecrafts dilution is carried out are given.

Key words: spacecraft, spacecrafts collision, group launch.

Alexandrov M.A., Volozhinsky A.O., Minakov E.P. Models for estimating predicted probability of using orbital groups of earthspacecraft in spatial-temporal areas of information support for fleet force groups // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 671. – P. 218–226.

The work is devoted to assessing the forecast probability of successful use of Earth-Earth space vehicles and their orbital groups by areas located on the Earth 's surface at specified time intervals. The approaches to modelling the spatial position of the areas of action of the fleet forces groupings and assessing their coverage with survey bands of land-use spacecraft are described. Mathematical dependencies for determining said probability and an example for estimating said probability are provided for estimating the predicted probability of using orbital groups of earth-Earth spacecraft.

Key words: expected probability of application, space-time area, zone of the review of the spacecraft, strip of the review of the spacecraft.

Alekseev K.V., Lebedev E.L., Samoilo N.S. Using of acoustic emission tools for crackle form registration in constructional material of the arm and military technics elements in the conditions of sign-variable loading // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 671. – P. 227–233.

The paper presents results of experimental studies using acoustic emission systems for the registration of cracking in samples made of 1160 (Д16АТ) alloy. The samples were tested for uniaxial tension with the application of alternating load, while simulating a technological or operational defect - a stress concentrator in the form of a crack, the development of which was fragile. Simulation of the stress concentrator was carried out using the technology of liquid metal embrittlement of aluminum alloys. The possibility of registration of the beginning of the formation and development of a crack developing by a viscous way from a stress concentrator is shown. We substantiate the parameters of acoustic emission signals, the informativeness of which is sufficient to solve this

problem. These parameters are related to the number N , the activity \dot{N}_{Σ} , the energy E and the energy activity \dot{E}_{Σ} of signal s . The differences in the regularities of changes in these parameters in the process of crack development under the simultaneous influence of static stress and alternating load are shown.

Key words: cracks, alternating loads, acoustic emission.

Arseniev V.N., Baluev S.Y., Belikhin E.N. Model of onboard optical and electronic means for studying dependence of its error on values of parameters // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 671. – P. 234–237.

The dependence of the error of on-board optoelectronic devices (BOES) on the values of their parameters is investigated. The BOES error is characterized by the error in estimating the coordinates of the center of the image of a space object (KO). A mathematical model has been developed that allows one to determine the BOES error for a specific set of parameter values. The results of studies using this model are shown, showing the characteristic features of the error in varying the value of the BOES parameters.

Key words: optoelectronic devices, matrix receivers of optical radiation, measurement error.

The influence of seasonal factors on the height of destruction of the separating parts of space rockets on a passive trajectory / K.B. Boldyrev, A.Y. Karchin, I.Y. Kubasov, A.A. Sasunkevich // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 671. – P. 238–245.

The article presents the results of a study of the relationship between the parameters of fracture separating rockets on a passive site of a trajectory from the seasonal factors of the atmosphere. The parameters of the spent missile blocks destruction serve as the initial data of ballistic calculations, which allow to increase the reliability of forecasting the coordinates of the falling points of fragments of the separating parts of the launch vehicles. The influence of seasonal factors on the statistical characteristics of the destruction height of the Soyuz launch vehicle on the passive section of the trajectory under different atmospheric conditions is shown.

Key words: launch vehicle, rocket block, separating part, passive part of the trajectory

Vivchar R.M., Pachin A.V., Reshetnikov D.V. Estimation of the influence of the intensity of the launch of space apparatus for military purpose on the parameters of the system for ensuring the readiness of the space retail release // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 671. – P. 246–253.

In the publication, with the help of the developed methodology for selecting the values of the parameters of the system for ensuring the readiness of a space launch vehicle for launch, the influence on these parameters of the launch intensity of military spacecraft was considered. The calculation of the optimal values of the parameters of the preparedness system is given on the example of a process consisting of three successively performed technological operations of the technological schedule of preparing a medium-class launch vehicle for various launch intensity of military spacecraft. The images of the Pareto-optimal solutions set for the specified process are presented in the space spent on money and the total amount allocated for the storage of spare parts. The impact on the resulting decisions on the launch intensity of military spacecraft is estimated. Practical recommendations and proposals for a set of measures based on the obtained optimal values of the parameters of the preparedness system were developed.

Key words: space rocket, launch vehicle, readiness system, launch vehicle launch intensity, technological operation.

Vozmischev I.Y., Kleymenov V.V. Determination of limitations of the laser reference star application related to the level of atmospheric turbulence in observations of space objects // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 671. – P. 254–258.

Analytical dependences of estimation of boundary conditions of application of sodium laser reference star at which compensation of atmospheric phase distortions is effective are presented. The restrictions related to the ratio of the random RMS angular deviation of the laser beam in a turbulent atmosphere to the angle of isoplanatism, which in turn depend on the parameter r_0 , are considered.

Key words: turbulent atmosphere, adaptive optics, isoplanatic angle, laser reference star, coherence radius, laser beam jitter dispersion.

Analysis of working processes and evaluation of the level of mechanical efficiency of reciprocating compressors with linear drive for gas supply and life support systems of weapons facilities / I.V. Voroshilov, A.V. Kazimirov, Y.I. Molodova, A.V. Molostov, A.I. Prilutsky, I.K. Prilutsky // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 671. – P. 259–279.

The paper presents the results of the study of working processes and parameters of two-stage piston compressors of medium pressure with a linear drive, operating on pure gases, gas and vapor-liquid mixtures of arbitrary composition at positive and negative temperatures of the working medium at the compressor inlet. Among them, the most recently mentioned in the literature are hydrogen-containing mixtures, steam gases in liquefied natural gas transportation systems and steam-air mixtures (containing oil vapor, gas condensate, gasoline and air), the liquefaction of which in installations based on piston expander-compressor units with a compressor capacity of up to 3000 Nm³/h allows to significantly reduce emissions into the atmosphere of oil vapors generated during storage and discharge operations and return them to the production cycle in the form of a liquid product.

The work focuses on the forecast of technical and economic indicators of existing and projected gas compressors. The scientific solution of the problem is based on the application of the author's program KOMDET with the subprogram "Properties of working substances", which are based on a mathematical description of the properties of real gases, gas, gas-liquid and steam-air mixtures and physical processes on the basis of fundamental equations of thermodynamics of a body of variable mass, heat- and mass transfer, mechanics and gas dynamics in combination with a set of empirical coefficients and dependencies obtained by testing structurally diverse simulating devices, laboratory and full-scale samples of piston machines for different purposes, the geometric dimensions of the cylinders, operating parameters, cooling and lubrication conditions.

Key word compressor, gases and gas mixtures, linear drive, operating processes, mechanical drive, dynamics of valve plates, heat and mass transfer, numerical analysis, optimization, forecast of technical and economic indicators.

Gera V.I., Kalmykov E.V., Nesterov O.S. Substantiation of requirements for the basic characteristics of the support system in the readiness of technical systems of space troops // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 671. – P. 280–287.

In this publication, the authors aim, taking into account the current technical condition of the system under consideration, to set the requirements for the system of maintenance in readiness. To solve the problem was built and described graph model of the technical system, containing a subsystem of technical support. To obtain the analytical dependence characterizing the model, the solution used the approach of studying semi-Markov processes with nested Markov chains. The proposed approach allows to solve the problem of complex substantiation of requirements to the main characteristics of the system of maintenance in readiness of military equipment, choosing its variant with the set of these parameters, which provides the required value of the readiness coefficient.

Key words: failure, repair, maintenance, technical systems, operation, graph, model, probability.

Golovchinskij V.O., Kozlov V.V., Lagoon A.V. Coordination of resource allocation among the elements of the rocket and space complex in the analysis of emergency situations arising during its operation // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 671. – P. 288–295.

The results of the study on the coordination of resource allocation in the structure of the rocket and space complex under the condition of improving the quality of its life cycle are presented. The indicators have been identified resource allocation and on the basis of a semantic approach to the formation of an indicator of the efficiency of the processes of functioning of rocket and space complexes. As a result, the procedures work coordination system resources please using the principle of interaction allowed to show the reduction in the cost of operating the rocket-space complex.

Key words: rocket and space complexes, structural element, resource allocation, life cycle, emergency, indicator, coordinating processes.

Methodology for substantiation of generators of protective dispersed formations from exposure to factors of different physical nature / I.O. Golikov, V.A. Davidchuk, A.V. Lagun, D.V. Sadin // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 671. – P. 296–302.

A technique is proposed for substantiating generators of protective disperse formations from the influence of factors of various physical nature, which includes a mathematical model of two-speed dynamics of two-phase media and a modified method for calculating the second order of accuracy in space and time. The reliability of the method is confirmed by comparing the calculated and experimental results. The process of ejection of a gas-dispersed medium from a channel with different loading factors is investigated. The integral characteristics of barrage dispersed formations, such as the total velocity head and linear mass distributions in the axial and radial direction, are estimated.

Key words: substantiation technique, barrage dispersed formations

Dorozhko I.V., Kopeyka A.L., Osipov N.A. Simulation model for assessing the availability of complex technical complex, taking into account the indicators of control and diagnosis of technical condition // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 671. – P. 303–313.

The article presents the simulation model of estimation of the complex indicator of reliability (availability ratio) is presented taking into account the indicators of monitoring and diagnosing complex technical complexes, developed with the help of the modeling environment Stateflow software Matlab. Adequacy of the developed simulation model is confirmed by analytical calculations.

Key words: reliability, the control, diagnosing, availability ratio, reliability, errors, markov process, imitating model.

Karin A.I., Karin S.A., Oktyabrskiy V.V. Models of adaptive control systems of complex geospatial data processing in solving problems of monitoring geographically-distributed objects // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 671. – P. 314–325.

The model of functioning of system of complex processing of geospatial data on the basis of multichannel multistage systems of Queuing with priority service is developed. Based on this model, the principles and criteria of management of functioning of system of complex processing of geopro-space data, which formed the basis of the proposed conceptual model of adaptive management, models management system integrated spatial data processing based on adaptive feedback systems.

Key words: geospatial data, remote sensing of the Earth, complex processing, adaptive control with feedback, multi-channel multi-stage Queuing systems with priority maintenance.

Kobzarev I.M., Kopkin E.V. Use of the value of information measures by V.I. Korogodin for building flexible diagnostic procedures for recognizing the technical condition of on-board systems of space // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 671. – P. 326–337.

An algorithm is proposed for constructing a flexible diagnostic procedure for recognizing the technical condition of an object, taking into account the usefulness of the analyzed measurement information when using interval diagnostic features. The usefulness of diagnostic information is determined on the basis of the use of a measure of the value of information by V.I. Korogodin, modified as applied to the task of monitoring and diagnosis. A numerical example of the implementation of the algorithm is given.

Key words: technical condition, usefulness of diagnostic information, diagnostic feature.

Kopkin E.V., Popov N.A. An intelligent model of the onboard system of the spacecraft // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 671. – P. 338–348.

The article proposes an intelligent model of the onboard system of the small spacecraft «Stork-2D», reflecting the causal relationship between the results of measurements of telemetry parameters and its technical conditions, created based on automated system-cognitive analysis.

Key words: automated system-cognitive analysis, «Eidos» intelligent system, small spacecraft "Stork-2D".

Karagodin V.V., Rybakov D.V., Ryzhiy N.V. The use of the frequency method for the study of distribution electrical networks of special objects // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 671. – P. 349–355.

The widespread use of receivers of electrical energy with non-linear volt-ampere characteristics creates technical difficulties of using (resonance phenomena may occur) in electrical networks of special objects to compensate for the reactive power of batteries of static compensators designed for sinusoidal currents and voltages. The study of the operation of capacitor installations is possible by applying the frequency method, based on the use of transfer functions and frequency characteristics. The article discusses the use of frequency characteristics for the study of power supply systems using the mathematical package MatLab.

Key words: distributive electrical networks, reactive power compensation, non-linear loads, frequency characteristics, transfer functions.

Miroshnichenko A.V., Filatov A.V., Harebin D.A. Temporary model of the modes of functional operation of complex technical systems // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 671. – P. 356–360.

Annotation. A temporary model of the early-warning radar operation modes and its formalized description, which allows to identify intervals and time duration in which it is unacceptable or inappropriate to use the station's standard equipment for training combat crews, is proposed.

Key words: training facilities, modes of operation, training of military specialists, early warning radar, students, model, military specialists.

Lebedev E.L., Perfiliev A.S., Sultanov A.E. Analysis of vibration loading parameters of the housing rockets as a factor increasing the intensity of remaining life of welded joints of fuel tanks // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 671. – P. 361–367.

The potential conditions of accelerated crack development in different sections of carrier shells of launch vehicles tanks under the influence of combined low-frequency and high-frequency vibration loading during the flight are considered. The article presents the results of the analysis of the

nature of changes in time of deformations in different sections of the launch vehicle, taking into account the peculiarities of the implementation of its own longitudinal vibrations of the hull. The potential danger of imposing medium and high-frequency vibrations from the engine with respect to the accelerated development of cracks in the transverse joints of the shells of the first stage fuel tanks is noted.

Key words: launch vehicle, longitudinal vibration, crack development, resource, tank shells.

Prokopenko E.A., Shevchenko A.V., Yashkov S.A. The results of verification of the numerical simulation of the drag force on the hypersonic flow affecting on the elements of design objects of space rocket technology // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 671. – P. 368–376.

The article presents a comparative analysis of the results of numerical calculations performed using Ansys CFD instruments and experimental studies performed in the hypersonic impulse tube IT-1M in the Mozhaisky Military Aerospace academy, the drag coefficient of the objects of space rocket technology.. As the object of study, a thin cone, blunted in the sphere, is selected, this is a model of the head fairing of a space rocket. The results of the comparative analysis showed that the selected mathematical model of hypersonic flow the object of study, with a high degree of certainty, is consistent with the results of experimental studies, which allows it to be used as a base for numerical calculations of the aerodynamic characteristics of structural elements of objects of space and rocket technology moving at small angles of attack.

Key words: aerodynamic characteristics, hypersonic flow, space rocket technology, pulsed wind tunnel.

Trishunkin V.V. Model of joint operation of the system of operation of weapons of space troops and the system of orders and deliveries of technical material of space troops // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 671. – P. 377–384.

The functional model of joint system of the operation arms of the space forces and the system of orders and supplies of material resources, which describes the relationship between the processes of order and supply of material resources and main functions of the system exploitation of the weaponization of outer forces. In the proposed model, the functions of analyzing the quality of the joint operation of the SE vqv and the system of orders and deliveries and making adjustments to the management mechanisms of both operational and support processes based on determining the quality indicators of the solution of the SE vqv targets are highlighted.

Key words: technical material resources, ensuring the readiness of weapons, functional model.

Bagretsov S.A., Chernaya T.E. The method of determining the necessary conditions of training strategies changes (transformation points) in applying the principles of transformational theory of training // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 671. – P. 385–392.

The method is based on the model of studying the practical disciplines related to the processes of acquiring knowledge, skills and abilities of controlling the complex objects and processes that make up the basis of future professional activity. The article considers the polystructural transformational training process in the form of a set of mutually dependent strategies. In the framework of this model the method of determining the statistical threshold conditions (transformation points) of transition from one strategy of training to another is described. The problem is solved on the basis of construction the nonlinear regression dependence of the difference between the achieved and the limit levels of training. On the basis of the estimates of standard errors of the regression parameters according to the Student's criteria the interval regression values are defined. The transformation point is determined on the basis of the optimal Wald's decision-making rules in the conditions of the in-

dependent statistical estimates of the significance of the difference between the reached and the limit levels of training concerning its threshold value.

Key words: training models, transformational training process, the point of transformation, non-linear regression, standard errors of the regression parameters, Fisher's coefficient, Student's coefficient, the intervals of regression, the Wald's criterion.

Methodological bases of planning of activity of the military educational organization in the conditions of introduction of the electronic information and educational environment / I.Y. Voronkov, M.A. Golubev, L.V. Merzhvinskaya, N.A. Repyakh // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 671. – P. 393–400.

In article results of the analysis of functioning of a system of planning of the military educational organizations of the higher education are stated, the basic principles and approaches to improvement of planning of activity of higher education institution of the Ministry of Defence of the Russian Federation in the conditions of formation of the electronic information and education environment allowing to provide systemacity of planning, optimality of number of plans and responsibility for their development are presented.

Key words: military educational organization, electronic information and education environment, activity planning, planning matrix, principles of planning.

Dashkevich Y.V., Devyatkin A.M., Pankov A.V. Method of sample randomization for neural network learning used in the professional selection of candidates for the higher military education institutions // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 671. – P. 401–407.

The article represents the way to prepare the sample for neural network learning in the context of insufficient size of the learning sample. The method is based on the randomization of available data. The verification is conducted by using neural networks in the educational guidance of higher military schools applicants.

Key words: neural network, randomization, learning sample, professional selection.

Inozemtseva L.A., Kuzhikin N.S. Personal-oriented training of teachers of the Academy during the development of professional retraining and advanced training programs // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 671. – P. 408–412.

The article deals with the actual problems of professional retraining and advanced training of the teaching staff of the Academy on the basis of personality-oriented training.

Key words: personal-oriented training, professional retraining, advanced training programs, pedagogical technology, self-education, teachers personal development, motivation, pedagogical creativity.

Katcik V.O., Koksharov S.N. Proposals for the use of videoconferencing in the classroom in operational and tactical disciplines // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 671. – P. 413–416.

The article considers the result of a pedagogical experiment, the purpose of which was to increase the efficiency and quality of training of cadets of the academy when conducting classes in operational and tactical disciplines using information and communication technologies. Given suggestions on the use of videoconferencing in these classes.

Key words: information and communication technology, increase learning efficiency, pedagogical experiment, videoconference.

Kuzhikin N.S., Myshko V.V., Chikurov V.A. The model of formation of the basic professional educational programs of higher education for the enlarged group of specialties and areas of training of military specialists // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 671. – P. 417–423.

It is analyzed experience of basic professional educational program of higher education formation and corresponding evaluation tools for monitoring the performance of A.F. Mozhaisky Military Space academy's students and cadets; it is provided specific examples and practical propositions to the basic professional educational programs of higher education and evaluation tools development.

Key words: basic professional educational program of higher education, indicators and evaluation criteria, indicators, fund of evaluation tools, evaluation and methodological materials.

Ogorodnikov V.P. Information, ideology and truth in the structure of information confrontation // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 671. – P. 424–429.

In the article, in the context of the interpretations of the concepts of "information", "ideology", "truth" reveals the main characteristics and is made of philosophical and sociological analysis of the phenomenon of "informational confrontation". Reveal the basic components of such confrontation in modern conditions. Demonstrates that the information confrontation is inextricably linked and the struggle for truth in science, and with economic and political struggle. In this context, information confrontation involves the content of the concepts "information struggle" and "ideological struggle".

Key words: information, ideology, information confrontation, scientific knowledge, truth.

Cherkasova E.M. The formation mechanism of management of innovative activity in military universities of Russia // Proceedings of the Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A.F. Mozhaisky, 2019. – Release 671. – P. 430–437.

The article is devoted to the substantiation of the mechanism of management of innovative activity in military universities of the Russian Federation. The relevance of the topic is determined by the focus on innovative socially oriented type of development established in the strategic documents of Russia and the Ministry of defense. A distinctive feature of the mechanism is that innovation is interpreted as an activity to improve the factors of production involved in the implementation of activities, rights and social guarantees to students and staff, and the system of factors of production is interpreted as a system of institutional factors of production, based on the structural and functional theory of T. Parsons. The mechanism makes it possible to implement innovations of different types quickly and in a coordinated manner.

Key words: military University, innovation, management, mechanism, Ministry of defense of the Russian Federation.

Абакумов Артём Николаевич, преподаватель 53-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (951) 648-88-56.

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

Авксентьев Александр Алексеевич, старший научный сотрудник 21-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-97-21, aaa1508@yandex.ru

Александров Максим Андреевич, преподаватель 23-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-97-23, e-mail: maks.aleksandrov.vka@mail.ru

Алексеев Константин Владимирович, заместитель начальника 11-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-99-11.

Алёшкин Андрей Петрович, профессор 31-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-32, e-mail: a_aleshkin@mail.ru

Алимов Наиль Ильгизович, адъюнкт Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-22, e-mail: Nail-1986@mail.ru

Арсеньев Владимир Николаевич, профессор 25-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 262-02-22.

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, доктор экономических наук, профессор; тел.: 8 (911) 779-86-94, e-mail: sergeibagrecov@bk.ru

Бакурский Клим Валерьевич, докторант 31-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-99-31, e-mail: vka@mil.ru

Балуев Сергей Юрьевич, заместитель начальника 25-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-25;

Басыров Александр Геннадьевич, начальник 24-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 248-57-80, e-mail: alexandrerb@mil.ru

Белихин Евгений Николаевич, адъюнкт 25-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-25.

Болдырев Константин Борисович, доцент 13-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; 8 (911) 997-75-95, e-mail: vka@mil.ru

Булекбаев Дастанбек Абдыкалыкович, заведующий 111-й кафедрой Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-96-31, e-mail: atiman@mail.ru

Бучинский Дмитрий Игоревич, адъюнкт 37-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812)-347-95-35.

Вивчарь Роман Михайлович, адъюнкт 103-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-11, e-mail: david_lxii@mail.ru

Владимиров Владислав Владимирович, научный сотрудник – бортовой оператор 463-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 116-49-09, e-mail: vladimirov27.12.1987@mail.com

Власов Вячеслав Александрович, доцент 22-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-96-22, e-mail: vlasovsl@rambler.ru

Возмищев Иван Юрьевич, начальник 573-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) 962-24-03, e-mail: vantil@mail.ru

Вознюк Валерий Васильевич, доцент 37-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-35.

Воложинский Андрей Ольгертович, генеральный конструктор АО «Корпорация СПУ – ЦКБ ТМ» (109052, Россия, Москва, ул. Подъёмная, 12А); тел.: 8 (495) 673-67-87, e-mail: richmauzer@yandex.ru

Воронков Иван Юрьевич, начальник учебно-методического отдела Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук, доцент.

Ворошилов Игорь Валерьевич, генеральный директор ООО «Краснодарский компрессорный завод» (353204, Россия, Краснодарский край, ст-ца Динская, ул. Железнодорожная, 265А); кандидат физико-математических наук; тел.: 8 (800) 777-09-09 e-mail: gendir@tegas.ru

Гера Василий Иосифович, начальник 4-го факультета Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 833-41-13, e-mail: geratv33@mail.ru

Голиков Игорь Олегович, доцент 11-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-11, e-mail: igira55@yandex.ru

Головчинский Владимир Орестович, младший научный сотрудник 173-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8(926) 309-69-04, e-mail: gvoseverples1@ramber.ru

Голубев Михаил Александрович, доцент 109-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-97-62.

Давидчук Виктор Александрович, адъюнкт 11-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-11, e-mail: david_lxii@mail.ru

Дашкевич Ян Валерьевич, начальник учебного командного пункта 65-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-34, e-mail: ssyrin@yandex.ru

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

Дорошко Игорь Владимирович, старший преподаватель 26-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-26, e-mail: Doroghko-Igor@yandex.ru

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

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 (951) 648-88-56.

Закутаев Александр Алексеевич, начальник 562-й лаборатории – старший научный сотрудник Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-10, zakutaev.A@mail.ru

Зубарев Константин Константинович, адъюнкт 31-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812)347-95-32, e-mail: zubarew.konst@yandex.ru

Иванов Алексей Александрович, начальник 53-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-72, ivlelik@mail.ru

Иванов Алексей Олегович, начальник 43-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 393-95-72, iaomail@inbox.ru

Иноземцева Людмила Александровна, преподаватель 109-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 810-62-63, e-mail: lucilia@mail.ru

Кадуков Евгений Петрович, начальник 351-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (951) 648-88-56.

Казанцев Денис Иванович, начальник отдела информационных технологий Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-05, e-mail: zilan.ka@yandex.ru

Казимиров Артем Витальевич, заместитель начальника 15-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-18, e-mail: kizim2003@rambler.ru

Калмыков Евгений Витальевич, адъюнкт 43-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 263-95-36, e-mail: ek9112639536@yandex.ru

Калужный Алексей Викторович, адъюнкт 24-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 117-42-62, e-mail: alekseikalyuzhnyi@yandex.ru

Карагодин Владимир Викторович, профессор 44-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 227-36-79, e-mail: vladimirkar@rambler.ru

Карин Александр Иванович, научный сотрудник 5-го управления Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 325-14-15, e-mail: sa-sanya@yandex.ru

Карин Сергей Александрович, доцент 35-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук, доцент; тел.: 8 (812) 325-14-15, e-mail: Sergey.Karin@gmail.com

Карчин Александр Юрьевич, старший преподаватель 13-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); 8 (921) 374-03-00, e-mail: vka@mil.ru

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.

Клейменов Виктор Владимирович, главный научный сотрудник Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 964-07-44, e-mail: klevik2014@yandex.ru

Кобзарев Игорь Михайлович, заместитель начальника учебно-методического отдела Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-07, e-mail: kobzaryan@mail.ru

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

Козлова Наталья Александровна, научный сотрудник 321-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-74, e-mail: cozlowa.nat2012@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.

Копейка Александр Леонидович, адъюнкт 26-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-26.

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 (812) 347-95-65, e-mail: kopkins@mail.ru

Коцкович Алла Владимировна, старший преподаватель 112-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: +7 (812) 347-95-08, e-mail: alla_kotskovich_@mail.ru

Кубасов Игорь Юрьевич, преподаватель 16-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; 8 (981) 916-16-98, e-mail: vka@mil.ru

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

Кульвиц Алексей Владимирович, заместитель начальника 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, e-mail: kh_qqq@mail.ru

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.: 89119370902, e-mail: Kio@mail.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; тел.: 8 (812) 347-95-11, e-mail: vka@mil.ru

Лихачев Владимир Михайлович, профессор 111-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-96-31, e-mail: foldmar@yandex.ru

Макаров Андрей Александрович, доцент 31-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812)347-95-32, e-mail: almakand@mail.ru

Максимов Владимир Андреевич, преподаватель 24-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (900) 636-29-29, e-mail: falcon225@yandex.ru

Малюгин Александр Викторович, докторант 2-го управления Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук; тел.: 8 (812) 347-97-21, e-mail: awmalugin@mail.ru

Мамаев Юрий Николаевич, главный инженер АО «Научно-технический центр радиоэлектронной борьбы» (121357, Россия, Москва, ул. Вере́йская, 29, строение 135); кандидат технических наук, старший научный сотрудник; тел.: 8 (495) 609-61-77.

Масалкин Александр Алексеевич, начальник 272-й лаборатории 27-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (911) 740-02-63, e-mail: of.mas632@yandex.ru

Мержвинская Людмила Васильевна, начальник 612-й лаборатории – старший научный сотрудник Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук; тел.: 8 (812) 347-97-31.

Милосердов Игорь Васильевич, начальник отдела Центра системного анализа и моделирования АО «Научно-технический центр радиоэлектронной борьбы» (197198, Россия, Санкт-Петербург, Большой Смоленский пр., 2); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (905) 235-93-68, e-mail: ig.milos@yandex.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 (812) 347-97-23, e-mail: maks.aleksandrov.vka@mail.ru

Мирошниченко Александр Васильевич, Департамент Министерства обороны Российской Федерации по обеспечению государственного оборонного заказа Министерства обороны

Российской Федерации (129345, Россия, Москва, ул. Осташковская, 12); тел.: 8 (909) 994-92-77, e-mail: alexandrerb@mail.ru

Молодова Юлия Игоревна, старший преподаватель 114-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-18, e-mail: 5592085@mail.ru

Молостов Александр Валерьевич адъюнкт 15-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-18, e-mail: 5801252@mail.ru

Мысливцев Тимофей Олегович, профессор 36-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-99-31, e-mail: vka@mil.ru

Мышко Василий Васильевич, доцент 93-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-65, e-mail: vasvasmishko@mail.ru

Нестеров Олег Сергеевич, курсовой офицер-преподаватель 4-го факультета Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (969) 715-70-39, e-mail: nesterovoleg258@yandex.ru

Никитин Георгий Вячеславович, адъюнкт 53-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-57.

Новиков Александр Валерьевич, старший преподаватель 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-52, 8 (911) 760-25-49, e-mail: salska@mail.ru

Овчаренко Леонид Александрович, директор Центра системного анализа и моделирования АО «Научно-технический центр радиоэлектронной борьбы» (197198, Россия, Санкт-Петербург, Большой Смоленский пр., 2); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 412-07-09.

Огородников Владимир Петрович, профессор 109-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор философских наук, профессор; тел.: 8 (951) 668-24-86; e-mail: ogo-vladimir@yandex.ru

Октябрьский Владимир Валентинович, начальник 512-й лаборатории Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 325-14-15, e-mail: valentoss@gmail.com

Олейников Максим Иванович, начальник 41-го отдела – заместитель начальника 4-го управления Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 393-95-72, e-mail: olemmm@mail.ru

Осипов Никита Алексеевич, доцент 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.

Павлов Александр Николаевич, профессор 94-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 259-71-53, e-mail: pavlov62@list.ru

Панков Алексей Владимирович, докторант 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: olgap2003@inbox.ru

Паршуткин Андрей Викторович, профессор 37-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-35.

Пачин Андрей Владимирович, адъюнкт 103-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-11, e-mail: david_lxii@mail.ru

Перфильев Александр Сергеевич, заместитель начальника 13-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; 8 (812) 347-95-13, e-mail: vka@mil.ru

Петроченко Вячеслав Михайлович, доцент 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 297-75-95, e-mail: vmpetrochenko@mail.ru

Пилипенко Людмила Викторовна, младший научный сотрудник 241-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-21, e-mail: lysi-65@mail.ru

Попов Никита Александрович, адъюнкт 93-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-65, e-mail: nikitapopov90@ya.ru

Прилуцкий Андрей Игоревич, Институт точной механики и оптики (197101, Россия, Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, 49); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 559-20-85, e-mail: 5592085@mail.ru

Прилуцкий Игорь Кирович, старший научный сотрудник 11-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) 347-95-18, e-mail: 5592085@mail.ru

Проданец Виктория Анатольевна, старший преподаватель 111-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-96-31, e-mail: prodanets@mail.ru

Прокопенко Евгений Алексеевич, начальник 251-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) 833-19-51, e-mail: Prokopenko_work@mail.ru

Радионов Николай Васильевич, профессор 22-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор экономических наук, доцент; кандидат технических наук; тел. 8 (812) 347-95-22 e-mail: radio-nov_nv@mail.ru

Репях Николай Андреевич, заведующий 109-й кафедрой Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат философских наук, доцент; тел.: 8 (911) 990-02-38, e-mail: utkinodacha@yandex.ru

Решетников Дмитрий Владимирович, заместитель начальника 103-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-11, e-mail: david_lxii@mail.ru

Рыбаков Дмитрий Вячеславович, преподаватель 44-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (911) 914-98-02, e-mail: d_i_m_a_1_7@bk.ru

Рыжий Николай Витальевич, адъюнкт 44-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (931)334-57-37, e-mail: nikolya.ryzhiy@mail.ru

Савочкин Павел Владимирович, заместитель начальника 31-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 272-56-73, e-mail: p_gehon@mail.ru

Садин Дмитрий Викторович, профессор 11-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-11, e-mail: sadin@yandex.ru

Самойлов Николай Семенович, профессор 11-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-99-11.

Саркисян Александр Павлович, генеральный директор АО «Научно-технический центр радиоэлектронной борьбы» (121357, Россия, Москва, ул. Вере́йская, 29, строение 135); кандидат технических наук, старший научный сотрудник; тел.: 8 (495) 609-61-77.

Сасункевич Александр Анатольевич, преподаватель 21-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-21, e-mail: vka@mil.ru

Старицин Сергей Сергеевич, преподаватель 53-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-57.

Султанов Алексей Эдыгарович, старший преподаватель 13-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; 8(812) 347-95-13, e-mail: vka@mil.ru

Суржиков Вячеслав Фёдорович, доцент 112-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, старший научный сотрудник; тел. +7 (812)347-95-08, e-mail: vyacheslavs@bk.ru

Тимошук Александр Сергеевич, старший преподаватель 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-52, 8 (981) 848-32-95, e-mail: astim2@yandex.ru

Тришункин Владимир Викторович, начальник Штаба материально-технического обеспечения Вооруженных сил Российской Федерации (119160, Россия, Москва, Большой Козловский пер., 6); кандидат экономических наук; тел.: 8 (495) 693-21-04.

Филатов Андрей Владимирович, старший преподаватель Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13) кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-97-35, e-mail: filatovaw@rambler.ru

Фомин Алексей Викторович, преподаватель 37-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-35.

Хабаров Роман Сергеевич, адъюнкт 27-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-21, e-mail: xabarov1985@gmail.com

Халиков Эльдар Мавлютович, начальник 27-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (911) 727-49-83, e-mail: khalikov.eldar@yandex.ru

Харбин Денис Александрович, АО «Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца» (127083, Россия, Москва, ул. 8 Марта, 10, стр.1); тел.: 8(468)614-06-62, e-mail: info@rti-mints.ru

Хасанов Антон Юрьевич, начальник 161-й учебной лаборатории 16-й кафедры 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

Хлебников Сергей Германович, старший научный сотрудник 242-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук; тел.: 8 (812) 347-97-21, e-mail: e190ng@mail.ru

Цыкунов Владислав Николаевич, адъюнкт 31-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-99-31, e-mail: vka@mil.ru

Чащин Игорь Вячеславович, начальник 412-й лаборатории 41-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (981) 962-68-22, e-mail: chaschin.igor21631@yandex.com

Черкасова Екатерина Михайловна, профессор 108-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат экономических наук, доцент; тел.: 8 (812) 476-03-98, e-mail: cherkasova@rambler.ru

Черная Татьяна Эдуардовна, преподаватель 15-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д.13); тел.: 8 (911) 242 07 07.

Чернов Иван Владимирович, преподаватель 73-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-76, E-mail: vka-onr@mil.ru, 4ern86@bk.ru

Чикуров Виталий Александрович, начальник 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: chikurov69@bk.ru

Шевченко Артём Васильевич, начальник 17-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13), кандидат технических наук; тел.: 8 (960) 249-69-64, e-mail: Prokopenko_work@mail.ru

Шишкалов Андрей Владимирович, доцент 53-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-57.

Шушаков Алексей Олегович, заместитель начальника 2-го факультета Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (911) 013-85-25; e-mail: shushakovaleksei@mail.ru

Яхваров Егор Константинович, начальник 222-й лаборатории Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-22, e-mail: egor248-21@mail.ru

Яшков Сергей Алексеевич, начальник 171-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 (981) 848-74-80.

Аверкиев Николай Фёдорович, профессор 16-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-16.

Алексеев Виктор Фёдорович, старший научный сотрудник 16-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 217-03-39.

Алексеев Тимофей Владимирович, профессор 108-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор исторических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-04.

Алёшкин Андрей Петрович, профессор 31-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-31.

Басыров Александр Геннадьевич, начальник 24-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 248-57-80, e-mail: alexanderbas@mail.ru

Башкирцев Виктор Павлович, профессор 109-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат педагогических наук, доцент; тел.: 8 (911) 218-23-57.

Булекбаев Дастанбек Абдыкалыкович, заведующий 111-й кафедрой Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-07.

Бянкин Александр Александрович, профессор 34-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-70, e-mail: rk@viek.ru

Ватугин Михаил Алексеевич, доцент 23-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-58.

Волков Валерий Фёдорович, профессор 91-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор военных наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-64.

Горбулин Владимир Иванович, профессор 22-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 299-27-76, e-mail: v_gorbulin@mail.ru

Деев Владимир Викторович, старший преподаватель 93-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-65.

Еремеев Игорь Юрьевич, профессор 53-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 238-06-62.

Калинин Владимир Николаевич, профессор 112-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации, доктор технических наук, профессор; действительный член Российской академии космонавтики имени К.Э. Циолковского и Санкт-Петербургской инженерной академии; член-корреспондент Международной инженерной академии, Российской инженерной академии, Международной академии информатизации; тел.: 8 (812) 347-95-08, e-mail: kvn.112@mail.ru

Козырев Геннадий Иванович, профессор 34-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (904) 217-33-99, e-mail: gen-kozyrev@yandex.ru

Косырев Сергей Викторович, профессор 104-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор военных наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-96-93.

Кунтурова Надежда Борисовна, профессор 111-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, (197198, 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, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13), доктор технических наук, профессор; 8 (812) 347-95-11, e-mail: vka@mil.ru

Летучий Юрий Александрович, старший научный сотрудник 32-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 235-28-71, e-mail: vka.52@mail.ru

Мальцев Георгий Николаевич, профессор 32-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-32, e-mail: georgy_maltsev@mail.ru

Минаков Евгений Петрович, профессор 23-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 247-98-01, e-mail: ep.minakov12345@mail.ru

Мысливцев Тимофей Олегович, начальник 31-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-99-31, e-mail: vka@mil.ru

Новиков Евгений Александрович, доцент 35-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 218-51-19, e-mail: novikov.ev.g.alex@yandex.ru

Онуфрей Андрей Юрьевич, ведущий научный сотрудник 5-го управления Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайско-

го (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 230-28-15.

Пирогов Сергей Юрьевич, начальник 13-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук; тел.: 8(812) 347-95-25, e-mail: pirogov205@mail.ru

Полянина Анна Иосифовна, доцент 108-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат экономических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-97-85.

Попов Александр Сергеевич, старший научный сотрудник 2-го управления Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор.

Пятков Вячеслав Викторович, профессор 82-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-97-77.

Садин Дмитрий Викторович, профессор 11-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-11, e-mail: sadin@yandex.ru

Сеньченков Валентин Иванович, профессор 43-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-96-43.

Смагин Владимир Александрович, профессор 96-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор.

Фоминов Иван Вячеславович, начальник 21-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-21.

Харченко Александр Викторович, начальник 32-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-99-32.

Хомоненко Анатолий Дмитриевич, профессор 27-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-24.

Чарушников Александр Валерьевич, начальник 2-го управления Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор военных наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-96-21.

Щукин Георгий Георгиевич, профессор 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор физико-математических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-52.