

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

**Выпуск 682
2022 г.**

Научное рецензируемое издание
Выходит с 1942 года

Издатель:

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

Редакционный совет

Председатель:

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

Члены редакционного совета:

- С. В. Буг** – *доктор пед. наук, проф.* (Михайловская военная артиллерийская академия);
В. П. Гаенко – *доктор техн. наук, проф., заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации*
(12 Центральный научно-исследовательский институт Министерства обороны Российской Федерации);
А. М. Гончаров – *доктор воен. наук, проф.* (Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»);
М. А. Еремеев – *доктор техн. наук, проф.* (Московский технологический университет);
А. В. Кузичкин – *доктор техн. наук, проф.* (акционерное общество
«Научно-исследовательский институт телевидения»);
А. В. Сержантов – *доктор воен. наук, проф.* (Военная академия Генерального штаба
Вооруженных Сил Российской Федерации);
Б. В. Соколов – *доктор техн. наук, проф., заслуженный деятель науки Российской Федерации*
(Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук);
К. Г. Ставров – *доктор техн. наук, проф.* (Научно-исследовательский океанографический центр
акционерного общества «Государственный научно-исследовательский
навигационно-гидрографический институт»)

Главный редактор:

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

Редколлегия:

- председатель **Ю. В. Кулешов**, *доктор техн. наук, проф.*;
зам. председателя **И. В. Сахно**, *доктор техн. наук, проф.*;
ответственный секретарь **А. Л. Федер**, *доктор воен. наук, доц.*;
Н. Ф. Аверкиев, *доктор техн. наук, проф.*; **В. Ф. Алексеев**, *доктор техн. наук, проф.*;
Т. В. Алексеев, *доктор истор. наук, доц.*; **А. П. Алёшкин**, *доктор техн. наук, проф.*;
В. Н. Арсеньев, *доктор техн. наук, проф.*; **Д. Н. Бирюков**, *доктор техн. наук, 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. Кунгурова**, *доктор пед. наук, доц.*;
Е. Л. Лебедев, *доктор техн. наук, проф.*; **А. Г. Ломако**, *доктор техн. наук, проф.*;
А. И. Лоскутов, *доктор техн. наук, проф.*; **Г. Н. Мальцев**, *доктор техн. наук, проф.*;
Т. О. Мысливцев, *доктор техн. наук, доц.*; **А. Н. Павлов**, *доктор техн. наук, проф.*;
А. В. Паршуткин, *доктор техн. наук, проф.*; **Н. А. Репях**, *кандидат филос. наук, доц.*;
А. М. Сычева, *доктор техн. наук, доц.*; **И. В. Фоминов**, *доктор техн. наук, доц.*;
А. В. Харченко, *доктор техн. наук, проф.*; **К. Ю. Цветков**, *доктор техн. наук, проф.*;
А. В. Чарушников, *доктор воен. наук, проф.*

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

Ответственный за выпуск:
редактор *А. В. Головина*

Технический редактор
и компьютерная верстка: *Е. Е. Лавриенко*

Техническая поддержка:
К. И. Чувирова

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

Подписано к печ. 21.03.2022.
Формат печатного листа 445×300/4.
Уч.-печ. л. 84,00. Уч.-изд. л. 41,75
Тираж 30 экз. Заказ 3954/82.
Отпечатано в типографии
Военно-космической академии
имени А.Ф. Можайского

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

- Краснов С. А., Лохвицкий В. А., Хабаров Р. С.* Численный анализ многоканальных систем массового обслуживания с абсолютным приоритетом на основе фазовой аппроксимации периода непрерывной занятости 7

СВЯЗЬ, УПРАВЛЕНИЕ, НАВИГАЦИЯ И ВОЕННАЯ РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

- Авксентьев А. А.* Метод наименьшего отрезка между линиями визирования для расчета координат космического объекта 21
- Бакурский К. В., Макаров А. А., Мысливцев Т. О., Никифоров С. В.* Алгоритм формирования аналитической групповой шкалы времени на основе фильтра Калмана с адаптивным рекуррентным подбором весовых множителей для текущего вектора состояния 29
- Вознюк В. В., Копалов Ю. Н., Фомин А. В.* Способ повышения помехоустойчивости приемников фазоманипулированных сигналов с расширением спектра псевдослучайной последовательностью на основе применения фильтра-компенсатора помех 38
- Горбулин В. И., Поляков С. А., Скопцов А. А.* Учет критических этапов прохождения спутником теневых участков орбиты при обосновании орбитального построения высокоорбитальных систем с использованием диссимметричных полиструктур 48
- Ерохин В. И., Кадочников А. П., Какаев В. В.* Метод определения параметров орбиты космических объектов по измерениям на малых интервалах времени..... 60
- Коваленко Е. Л., Фадин И. А.* Модифицированный метод космической триангуляции 70
- Новиков Е. А., Севостьянов А. С., Степанова Е. А.* Модель обслуживания мультисервисного трафика со сложной структурой в сети спутниковой связи в условиях конфликтного взаимодействия сложных радиотехнических систем 77
- Топчий П. Н.* Синхронизация в цифровых радиоприемных системах при использовании шумоподобных фазоманипулированных сигналов 88

СБОР И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

- Алексеев В. Ф., Андриевская В. Ю., Данилова Т. Н.* О точности определения аномалий высот современными моделями гравитационного поля Земли 97
- Астапович А. В., Колесников Д. Д., Медяников Д. О.* Методика обоснования технических требований к измерениям при создании специальных геодезических сетей 103
- Жбанов К. К.* Модель получения нормальных высот рельефа по разнородной информации космических комплексов 111
- Канарский И. Д., Козлова Н. А., Королева О. А., Подчасский А. С.* Автоматизированная экспертная система оперативного контроля опасных природных процессов и явлений 120
- Козлов Н. А., Медяников Д. О., Прокофьев А. В., Сергеев Д. В., Щеколев А. А.* Передача ориентирования посредством беспилотных летательных аппаратов 130
- Лопуха В. О., Федосеева Н. В.* Спутниковый сравнительный анализ активности полярных мезоциклонов в Баренцевом и Карском морях за 2017–2021 годы 136
- Морозов Е. Б., Шершак А. Н.* Применение материалов зарубежных космических картографических систем для создания государственных топографических карт и государственных топографических планов 143

ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

- Бирюков Д. Н., Захаров О. О., Тимашов П. В.* Подход к снижению рисков информационной безопасности, связанных с применением макросов в офисных документах 150

РАЗРАБОТКА, ИСПЫТАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВООРУЖЕНИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ

- Антропова А. В., Козлов В. В., Лагун А. В., Лямин К. А.* Математическая модель оценивания динамических характеристик систем амортизации защищаемых объектов 162
- Бурлуцкий С. Г., Голосий А. С., Ковалёв А. П., Сахабудинов Р. В.* Оценивание характеристик токовых генераторов имитации молниевых разрядов 171
- Дьяков А. Н., Кокарев А. С., Левчук А. А., Орлов А. С.* Модель технического обслуживания и ремонта пространственно распределенного объекта эксплуатации... 183
- Дьяков А. Н., Кокарев А. С., Пачин А. В., Шаповалов Д. В.* Модель поддержания готовности многоканальных устройств с регламентированным обслуживанием ... 193

<i>Казахов Б. Д., Козлов В. В., Лагун А. В.</i> Оценка возможности адаптации ракетного комплекса к внешним деструктивным воздействиям	203
<i>Клепов А. В., Степенко А. Н., Шаповалов Д. В.</i> Разработка подходов к обоснованию затрат на поставку оборудования при создании или модернизации объектов наземной космической инфраструктуры	215
<i>Крыжановский В. И., Слатов С. В., Трофимов И. А.</i> Итерационный алгоритм оптимального по быстродействию управления разворотом космического аппарата дистанционного зондирования Земли	226
<i>Николаев А. Ю., Самойлов Е. Б., Шмелёв В. В.</i> Модель выявления семантических ошибок в алгоритмах первичной обработки телеметрической информации космических средств	238

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

<i>Алтухов А. И.</i> Проблемы разработки дидактических и эргономических компонентов электронного учебника по физике	248
<i>Гузенко В. Л., Дорохов В. Л., Курдай Н. В.</i> Использование концепции «приемлемого риска» при обеспечении безопасности объектов учебно-материальной базы боевой подготовки в повседневной деятельности войск	257
<i>Девяткин А. М., Раков Е. С., Теренин А. Е.</i> Адаптация SIR моделей для решения задач организации обучения в вузе в условиях распространения новой коронавирусной инфекции	262
<i>Кабалин В. Л., Прищепина В. Н., Северенко А. В.</i> Проблемные аспекты управления боевой подготовкой в условиях ее интенсификации и подходы к их решению	272
<i>Соловьев А. В., Хрущ Р. М.</i> Совершенствование оценивания результатов промежуточной аттестации специальных дисциплин кафедры фототопографии и фотограмметрии	279

ВОПРОСЫ ГУМАНИТАРНЫХ И ОБЩЕСТВЕННЫХ НАУК

<i>Мальцев Г. Н.</i> История развития командно-измерительных систем и технологий радиоуправления космическими аппаратами от полета первых искусственных спутников Земли до сегодняшних дней	287
<i>Огородников В. П.</i> Система детерминаций научного поиска	294
<i>Репях Н. А., Хрустова А. Н.</i> Мировоззренческая парадигма Н. А. Умова в русском космизме	302

ОПЕРАТИВНОЕ ИСКУССТВО И ТАКТИКА

<i>Башляев Н. А., Гузенко В. Л., Дорохов В. Л., Федоров А. В.</i> Методический подход к обоснованию показателей и критерия оценивания эффективности решения задач охраны и обороны космодрома	308
Рефераты статей	317
Сведения об авторах	327
Сведения о рецензентах	334

С. А. Краснов,
кандидат технических наук;
В. А. Лохвицкий,
доктор технических наук;
Р. С. Хабаров

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ МНОГОКАНАЛЬНЫХ СИСТЕМ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ С АБСОЛЮТНЫМ ПРИОРИТЕТОМ НА ОСНОВЕ ФАЗОВОЙ АППРОКСИМАЦИИ ПЕРИОДА НЕПРЕРЫВНОЙ ЗАНЯТОСТИ

Предложен подход к расчету временных характеристик многоканальных систем массового обслуживания с абсолютным приоритетом и дообслуживанием прерванной заявки на основе аппроксимации периода непрерывной занятости распределениями фазового типа. Данный подход является обобщением известного метода последовательного сокращения размерности (ПСР) в случае произвольных значений коэффициентов вариации времени обслуживания. Изложено обоснование выбора варианта фазовых распределений для аппроксимации времени обслуживания и периодов непрерывной занятости. Представлены результаты расчетов в сравнении с данными имитационного моделирования и метода инвариантов отношения в зависимости от числа каналов, коэффициента загрузки и коэффициента вариации времени обслуживания.

Ключевые слова: M/G/n, M/Ph/n, многоканальные системы массового обслуживания, приоритетное обслуживание, периоды непрерывной занятости, абсолютный приоритет.

ВВЕДЕНИЕ

Модели систем массового обслуживания (СМО) часто используются на этапе проектирования сложных систем для обоснования характеристик их производительности. Примерами таких систем являются центры обработки данных, морские и речные порты, лечебные учреждения, автоматические телефонные станции и др.

Особое значение модели СМО имеют при анализе функционирования вычислительных систем и сетей. С учетом требований производительности, надежности, а также организации технического обслуживания большинство узлов вычислительных систем и сетей являются многоканальными. Поступающие в такие системы задачи, как правило, различаются по важности, трудоемкости, а также по требованиям к оперативности обработки, что приводит к необходимости введения приоритетных дисциплин обслуживания в узлах. Считается, что предположение об экспоненциальном времени обслуживания для большинства реальных систем неверно [2]. Таким образом, для анализа вычислительных систем следует использовать модели неэкспоненциальных СМО с многоканальными узлами и приоритетными дисциплинами обслуживания.

Расчет временных характеристик систем массового обслуживания с приоритетами является сложной научной проблемой, хотя для одноканального случая точное решение было получено в 1950-х гг. [3]. Однако для случая большего числа каналов точное решение не получено до настоящего времени.

В подавляющем большинстве работ, посвященных анализу многоканальных СМО с приоритетами, рассматривается случай экспоненциального времени обслуживания заявок. Практически все подходы к анализу СМО типа M/M/n включают анализ цепей Маркова, которые для случая двух классов бесконечно растут в двух направлениях (по одному для каждого класса). С целью преодоления этой проблемы исследователи различными способами упрощают цепь Маркова. В работах [4] и [5] предложен подход, при котором урезается число микросостояний для классов с высоким приоритетом и низким приоритетом соответственно.

В источнике [6] предложена грубая аппроксимация на основе агрегирования состояний. В статье [7] предложена аппроксимация для системы с ограниченным числом состояний. К сожалению, перечисленные подходы характеризуются существенным ростом погрешностей искомых вероятностно-временных характеристик при высоких коэффициентах загрузки.

Другим направлением подхода к анализу СМО типа $M/M/n$ с приоритетами является применение итерационных методов расчета (методы матрично-геометрической прогрессии (МГП) и Такахаси – Таками [24]). Потенциально перечисленные методы могут быть непосредственно использованы для анализа цепей Маркова, бесконечных в двух измерениях (например, в работе [8]). Они намного более эффективны для расчета одномерных цепей Маркова. Поэтому в большинстве работ прибегают к предварительному сведению цепи Маркова к одномерной (например, путем введения ограничения на число заявок в системе [4, 5, 9, 10]). Однако такой подход демонстрирует низкую точность при коэффициентах загрузки, больших 0,8.

Третьим направлением исследований является подход на основе решения уравнений баланса с помощью производящих функций [11–15]. Такой подход приводит к громоздким математическим выкладкам, дающим нестабильные решения при высоких коэффициентах загрузки.

Стоит заметить, что необходимость введения приоритетов обусловлена функционированием систем в режимах, близких к насыщению. Поэтому выполнение требований к точности оценок временных характеристик систем именно при высоких коэффициентах загрузки имеет первостепенное значение. На основе проведенного выше анализа нетрудно сделать вывод, что предложенным подходам свойственен рост ошибок при высоких коэффициентах загрузки. Это делает такие подходы непригодными для практического использования при проектировании сильно загруженных систем.

Кроме того, есть работы, где предложены подходы для случая, при котором заявки с разными приоритетами имеют одинаковые средние времена обслуживания [16, 17].

В источнике [19] предложена аппроксимация на основе инвариантов отношения (ИО), обобщенная в работе [20] для неэкспоненциального времени обслуживания и для высших моментов времен пребывания в СМО. Суть предложенной аппроксимации заключается в применении символической пропорции между показателями подобных СМО в виде

$$M_k / G_k / n / prio \approx M_k / G_k / 1 / prio \cdot \frac{M / G / n / FCFS}{M / G / 1 / FCFS}. \quad (1)$$

В выражении (1) 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 МГП.

В источниках [21–23] предложены методы численного расчета для многоканальных СМО с абсолютным и относительным приоритетами. Эти методы основаны на аппроксимации периода полной непрерывной занятости. В результате получены решения для следующих случаев:

- время обслуживания заявок для всех классов распределено по экспоненциальному закону;
- время обслуживания одного из классов является произвольным и аппроксимируется гиперэкспоненциальным распределением 2-го порядка, а другого класса – по экспоненциальному закону.

Подобный подход также представлен в работе [1] для анализа СМО типа $M/Ph/n$ с абсолютным приоритетом и произвольным числом классов, называемый методом последовательного сокращения размерности (ПСР). Ключевая идея предложенного метода заключается в сведении бесконечной m -мерной цепи Маркова, соответствующей пространству состояний с m классами заявок, к одномерной. Указанный подход позволяет получить решение быстрее (по сравнению с имитационным моделированием) и с высокой точностью [относительная погрешность по сравнению с результатами имитационного моделирования (ИМ) при различных параметрах не превысила 4%]. Однако в упомянутой работе были представлены резуль-

таты расчетов только для коэффициента вариации времени обслуживания заявок, большим единицы. Связано это с тем, что для аппроксимации времени обслуживания использовалось распределение Кокса 2-го порядка, параметры распределения которого при значении коэффициента вариации, меньшем единицы, становятся комплексными.

В данной работе предлагается обобщение подхода [1, 21–23] для значений коэффициентов вариации распределения времени обслуживания, как меньших единицы, так и *превышающих* единицу. Дальнейшая структура работы будет следующей. Сначала приводится общее описание метода ПСР. Далее выполняется обоснование выбора варианта фазовых распределений для аппроксимации времени обслуживания и периодов непрерывной занятости. Затем демонстрируются зависимости погрешностей результатов, полученных методом ПСР, методом ИО в сопоставлении с результатами ИМ.

МЕТОД ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО СОКРАЩЕНИЯ РАЗМЕРНОСТИ

Приведем здесь краткое описание предложенного в работе [1] метода ПСР. В данной статье представлены два варианта реализации ПСР – без агрегирования заявок старших приоритетов в один класс и с агрегированием. Рассмотрим второй вариант, практически не отличающийся по точности расчетов, но значительно более эффективный в вычислительном плане. Метод состоит из следующих шагов:

1. Последовательное сведение системы с m -классами заявок к системе с двумя классами путем объединения заявок старших классов в один. Это возможно по причине того, что оперативность прохождения любого из $m-1$ старших классов не зависит от прохождения заявок менее приоритетных классов. С точки зрения влияния на обслуживание заявок текущего в последовательном расчете класса r заявки классов $r+1$ эквивалентны и могут быть объединены в один класс. При этом интенсивности поступления заявок в систему объединенных классов суммируются, а начальные моменты времени обслуживания в канале усредняются.

2. Аппроксимация времени обслуживания заявок и периодов непрерывной занятости заявок объединенного (старшего) класса распределениями фазового типа.

3. Построение матриц перехода и расчет полученной системы итерационными методами (МГП или Такахаси – Таками).

4. Нахождение среднего времени пребывания для заявок рассчитываемого класса по найденным вероятностям состояний системы. В работе [1] также предложен способ для нахождения высших моментов с помощью метода Ньютона [25].

Поскольку в [1] была достаточно убедительно продемонстрирована эффективность подхода на основе агрегирования заявок, далее будем рассматривать расчет систем только с двумя классами заявок, при этом для удобства изложения обозначим заявки искомого младшего класса буквой L , а заявки объединенного старшего класса – H .

ВЫБОР РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ФАЗОВОГО ТИПА ДЛЯ АППРОКСИМАЦИИ ВРЕМЕНИ ОБСЛУЖИВАНИЯ В КАНАЛЕ

От выбора распределения для аппроксимации времени обслуживания заявок H -класса зависит размерность матриц переходов. Дело не только в непосредственном количестве микросостояний аппроксимирующего распределения фазового типа, но и в количестве возникающих периодов непрерывной занятости.

В теории очередей в качестве аппроксимирующего распределения для времени обслуживания с коэффициентом вариации, меньшим единицы, принято использовать распределение Эрланга. Однако в этом случае очень быстро увеличиваются ширина диаграмм (максимальное число микросостояний на ярусе) и размерность матриц переходов.

На рис. 1 изображена диаграмма переходов для заявок класса H в системе $M/E_3/2$. Слева от черты указан номер яруса диаграммы, который соответствует количеству заявок класса H в системе. Микросостояние системы в пределах яруса представлено в виде трех чисел («ключа» микросостояния), каждое из которых соответствует количеству заявок, находящихся в соответствующей фазе E_3 -распределения. Следовательно, сумма позиций ключа равна числу задействованных каналов обслуживания. Таким образом, состояние системы определяется номером яруса и «ключом» микросостояния яруса. Параметр μ соответствует параметру аппроксимирующего распределения Эрланга, переходы вниз диаграммы осуществляются с интенсивностью λ_H и для удобства представления не показаны на диаграмме. Цветом обозначены состояния, из которых могут начаться и закончиться периоды непрерывной занятости (синим и оранжевым соответственно).

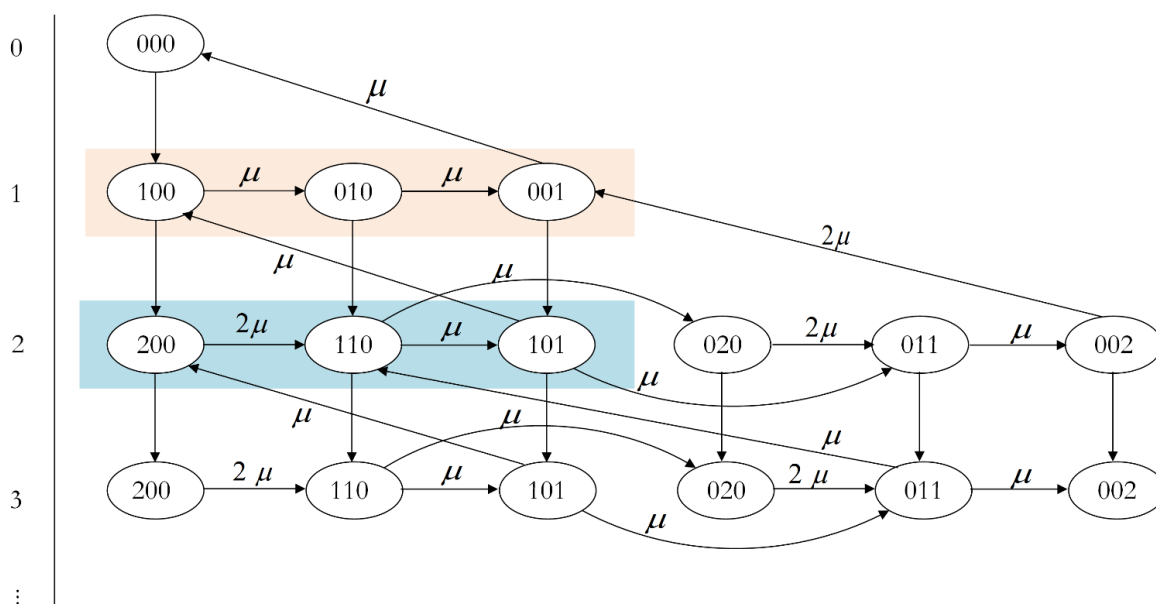


Рис. 1. Диаграмма переходов в системе $M/E_3/2$

Количество создаваемых заявками H -класса ПНЗ в данном случае равно 9 (число сочетаний из возможных состояний начала и окончания ПНЗ). Можно показать, что для общего случая число таких ПНЗ – N определяется как

$$N = \binom{n+k-2}{n}^2,$$

где n – число каналов системы;

k – порядок распределения Эрланга.

Как видно из приведенного соотношения, в случае аппроксимации времени обслуживания заявок H -класса распределением Эрланга при увеличении числа каналов и порядка распределения количество ПНЗ стремительно растет, что существенным образом скажется на скорости расчетов. Например, при 5 каналах и аппроксимации Эрлангом 5-го порядка N составит 56.

Для сравнения приведем диаграммы переходов для системы с двумя каналами и аппроксимации времени обслуживания двухфазными гиперэкспоненциальным распределением H_2 и распределением Кокса C_2 (рис. 2 и 3 соответственно). Диаграммы фазовых распределений для времени обслуживания заявок H -класса с параметрами $\mu_H^{(1)}, \mu_H^{(2)}, q_H, p_H$ представлены на рис. 4.

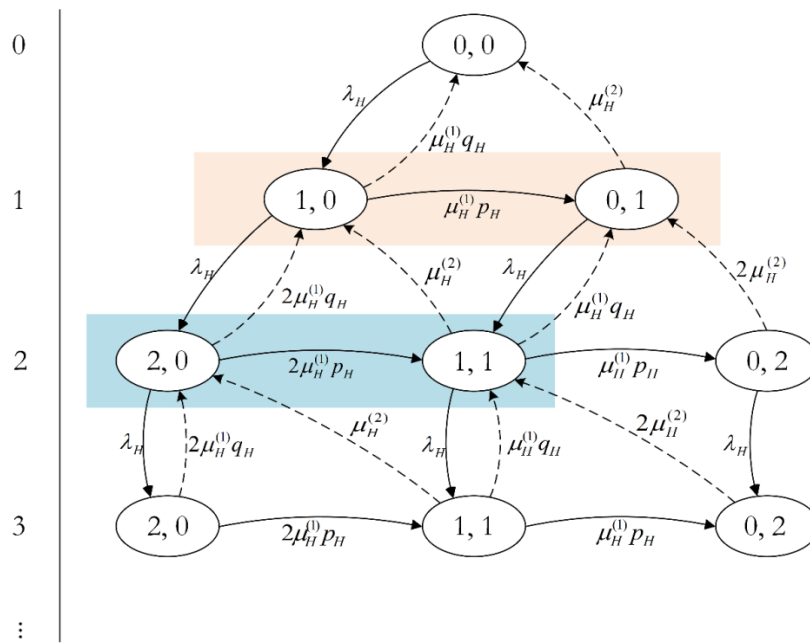


Рис. 2. Диаграмма переходов в системе M/C₂/2

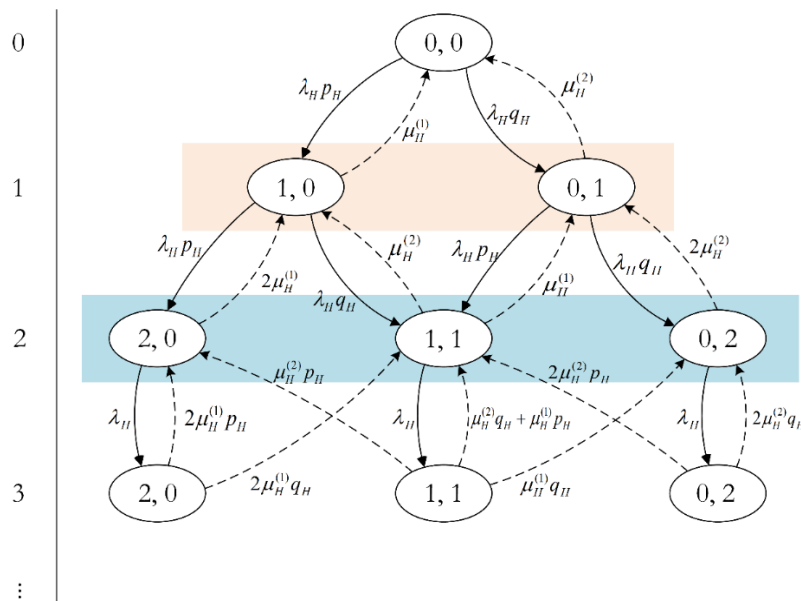


Рис. 3. Диаграмма переходов в системе M/H₂/2

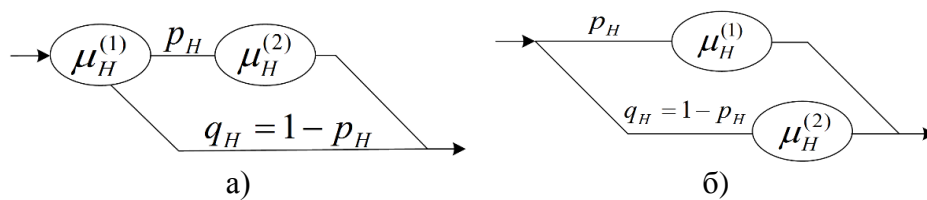


Рис. 4. Диаграммы 2-фазных распределений:
а – Кокса C₂; б – гиперэкспоненциального H₂

Здесь, как и на рис. 1, «ключ» микросостояния соответствует количеству заявок в соответствующей фазе распределения, а цветом обозначены состояния, из которых могут начаться и закончиться периоды непрерывной занятости. Как видно из приведенных диаграмм, в случае выбора в пользу распределения Кокса количество возникающих ПНЗ равно четырем, а в случае гиперэкспоненциального – шести. Можно показать, что в общем случае при числе каналов n для распределения Кокса число таких ПНЗ будет составлять n^2 , а для гиперэкспоненциального – $n(n+1)$. По сравнению с распределением Эрланга это значительно меньше.

Недостаток выбора данных распределений заключается в появлении парадоксальных значений параметров при аппроксимации распределений с коэффициентом вариации, меньшим единицы, а также в необходимости учета особых случаев. Для обоих распределений таким случаем является распределение Эрланга k -го порядка $k \leq 2$. При аппроксимации H_2 распределением для исключения аварийного завершения алгоритма моменты исходного эрланговского распределения начиная с k -го необходимо умножить на $1 + j\varepsilon$, где j – порядок момента, ε – допустимая относительная погрешность. Для распределения Кокса при $k = 1$ (показательное распределение) необходимо в качестве параметров выбрать $\mu_1 = 1/f_1$ и $y_1 = 0$ (значение μ_2 безразлично), при $k = 2$ следует принять $\mu_1 = \mu_2 = 2/f_1$ и $y_1 = 1$.

В табл. 1 приведены значения параметров распределений C_2 и H_2 при аппроксимации гамма-распределения с $\mu = 1$ в зависимости от параметра α и соответствующего ему коэффициента вариации $\nu = 1/\sqrt{\alpha}$.

Таблица 1

Параметры аппроксимирующих распределений

α	ν	C_2			H_2		
		y_1	μ_1	μ_2	y_1	μ_1	μ_2
0.6	1.3	0.473	3.323	0.677	0.594	0.677	3.323
0.8	1.1	0.577	3.155	0.845	0.789	0.845	3.155
1.0	1.0	0.000	1.000	1.000	0.985 - 0.013i	0.977 - 0.134i	0.764 + 3.324i
1.4	0.85	0.613	1.293	2.707	1.480 + 0.047i	1.278 - 0.030i	2.737 - 0.822i
1.8	0.75	0.912	1.622	2.378	1.275 - 0.004i	1.300 - 0.145i	-0.738 - 2.401i
2.0	0.71	1.000	2.000	2.000	1.329 + 0.042i	1.363 - 0.132i	-0.412 - 2.532i
2.4	0.65	1.111 + 0.027i	2.000 - 0.485i	2.000 + 0.485i	1.443 + 0.070i	1.472 - 0.168i	-0.217 - 2.756i
2.8	0.60	1.190 + 0.062i	2.000 - 0.649i	2.000 + 0.649i	0.959 + 1.818i	1.984 + 0.467i	2.017 - 0.842i
3.0	0.58	1.222 + 0.079i	2.000 - 0.707i	2.000 + 0.707i	0.884 + 1.740i	1.999 + 0.530i	2.002 - 0.891i
3.4	0.54	1.275 + 0.109i	2.000 - 0.798i	2.000 + 0.798i	0.801 + 1.640i	2.019 + 0.629i	1.982 - 0.970i
3.8	0.51	1.316 + 0.137i	2.000 - 0.866i	2.000 + 0.866i	0.758 + 1.580i	2.031 + 0.703i	1.969 - 1.030i
4.0	0.50	1.333 + 0.149i	2.000 - 0.894i	2.000 + 0.894i	0.743 + 1.559i	2.035 + 0.734i	1.965 - 1.055i

Как показывает практика расчетов систем типа $M/Ph/n$ [2] с дисциплиной $FCFS$, выбор в качестве аппроксимирующего фазового распределения данных распределений с парадоксальными параметрами не влияет на сходимость итерационных алгоритмов и дает осмысленные результаты без мнимой составляющей. Следует отметить, что предложенный в [25] алгоритм нахождения параметров в данном случае не подходит, поскольку не предполагает получения комплексных значений. Для расчета параметров аппроксимирующих распределений использовались алгоритмы, представленные в работе [2].

Ввиду того что число возникающих ПНЗ для распределения Кокса наименьшее из рассмотренных, а потенциальная возможность расчета с парадоксальными параметрами позволяет аппроксимировать распределения с произвольным коэффициентом вариации (как большим, так и меньшим единицы), в дальнейшем будем использовать метод ПСР.

ВЫБОР РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ФАЗОВОГО ТИПА ДЛЯ АППРОКСИМАЦИИ ПЕРИОДОВ НЕПРЕРЫВНОЙ ЗАНЯТОСТИ

Как и в случае с аппроксимацией времени обслуживания заявок старшего класса, выбор распределения для аппроксимации периодов непрерывной занятости влияет на ширину диаграммы переходов и на размерность соответствующих матриц. На рис. 5 представлена диаграмма переходов цепи Маркова для системы с двумя каналами, двумя классами и аппроксимацией распределением Кокса 2-го порядка времени обслуживания заявок старшего класса. Слева от черты указано количество заявок L -класса в системе. Переходы вниз диаграммы осуществляются с интенсивностью λ_L и для удобства представления исключены. Переходы вверх зависят от номера яруса k и для микросостояния с «ключом» 00 равны $\min(k, n)\mu_L$, а для оставшихся двух – μ_L . Вероятности $p_i, i = 1, \dots, 4$ соответствуют вероятностям переходов из состояний начала ПНЗ в состояния окончания соответствующих ПНЗ. Например, p_1 соответствует вероятности перехода из микросостояния с ключом 2,0 в 0,1 (см. рис. 2). Данные вероятности рассчитываются с помощью метода Ньютона, изложенного в источнике [Ошибка! Источник ссылки не найден.] и подробно описанного в [1].

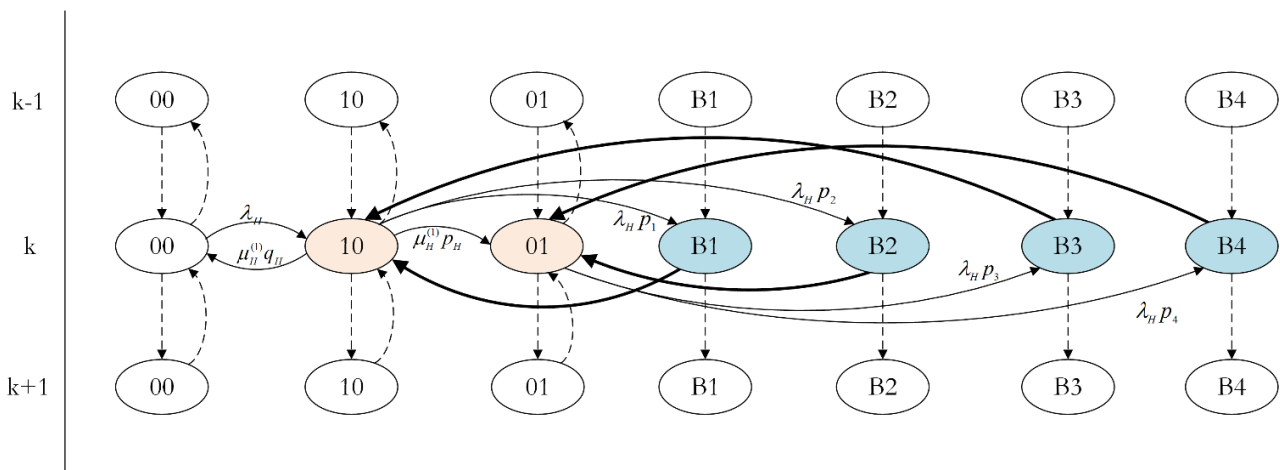


Рис. 5. Диаграмма переходов цепи Маркова для системы с двумя каналами, двумя классами и аппроксимацией Кокса 2-го порядка времени обслуживания заявок старшего класса

В качестве $B_i, i=1, \dots, 4$ обозначены ПНЗ. Соответственно, общее число микросостояний яруса для рассматриваемой системы равно $3+4r$, где r – число микросостояний аппрокси-

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ВАЛИДАЦИЯ

Остановимся на демонстрации результатов расчетов только для системы с двумя классами заявок, поскольку, как было показано в [1], расчет системы с большим количеством классов осуществим агрегацией заявок старших классов в один.

Будем рассматривать только вариант с «умной» приоритизацией, когда приоритет назначается заявкам с меньшими интенсивностью поступления и временем обслуживания. Для этого интенсивность λ_H везде выбиралась равной единице, а интенсивность $\lambda_L = 1.5$. Значения начальных моментов времени обслуживания подбирались в зависимости от коэффициента загрузки системы и коэффициента вариации времени обслуживания заявок H -класса при условии, что среднее время обслуживания заявок H -класса вдвое меньше среднего времени обслуживания заявок L -класса. Поскольку результаты для коэффициентов вариации времени обслуживания заявок H -класса, больших единицы, подробно представлены в [1], ниже будут приведены расчеты, главным образом, при коэффициентах вариации времени обслуживания заявок H -класса, меньших единицы.

Валидация осуществлялась путем сопоставления результатов, полученных методом ПСР с результатами ИМ, которые усреднялись после каждых 10 прогонов модели. В каждом прогоне с целью накопления временных характеристик через имитационную модель проходило 800000 заявок. Имитационная модель была написана на языке python.

Метод ПСР также был реализован на python с возможностью автоматического построения переходных матриц в зависимости от числа каналов и номера яруса. Поскольку, как упоминалось ранее, заявки H -класса при дисциплине обслуживания с абсолютным приоритетом фактически «не видят» заявок с младшими приоритетами, их временные характеристики рассчитываются стандартными способами [2, 23] и далее везде будут представлены результаты расчетов только для среднего времени обслуживания заявок L -класса.

На рис. 6 представлены графики зависимости среднего времени пребывания заявок L -класса и относительной погрешности δ от коэффициента загрузки системы, полученные методами ПСР и ИО в сравнении с результатами ИМ. Здесь и далее на рисунках метод с аппроксимацией ПНЗ C_2 -распределениями обозначен «C2», H_2 -распределениями – «H2», метод ИО – «Inv», результаты имитационного моделирования – «ИМ».

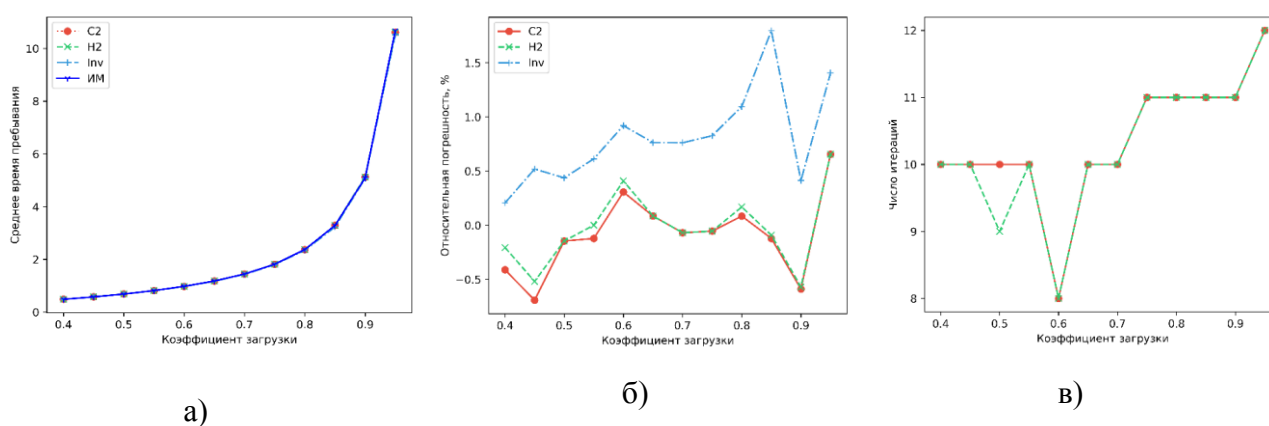


Рис. 6. Результаты расчета для $M/Ph/2$ с двумя классами в зависимости от коэффициента загрузки системы при $\nu_H = 0.42$ для исходных данных:

а – среднего времени пребывания в системе;

б – относительной погрешности, %;

в – числа итераций метода ПСР

В приведенных зависимостях относительная погрешность вычислялась по формуле

$$\delta = \frac{v_{\text{ИМ}} - v_1}{v_{\text{ИМ}}} \cdot 100 (\%), \quad (2)$$

где $v_{\text{ИМ}}$ – среднее время пребывания в СМО, полученное путем ИМ;

v_1 – среднее время пребывания в СМО, рассчитанное методом ПСР.

Как можно заметить, погрешность для обоих вариантов аппроксимации ПНЗ (C_2 и H_2) не превышает 1%, тогда как погрешность метода ИО несколько выше и приближается к 2%. Количество итераций для метода ПСР при указанных значениях параметров варьировалось от 8 до 12. Можно заметить, что выбор аппроксимирующего распределения практически не влияет на точность и требуемое количество итераций для сходимости алгоритма расчета. В дальнейшем для аппроксимации будем использовать распределение Кокса 2-го порядка (C_2).

В табл. 2 представлены результаты измерения времени работы методов ПСР и ИО в сравнении с длительностью ИМ в секундах.

Таблица 2
**Время работы методов ПСР и ИО в сравнении
с длительностью ИМ при расчете СМО типа М/Ph/2
с двумя классами заявок, с**

Коэффициент загрузки ρ	ПСР	Инв.	ИМ
0.40	1.578	1.094	96.30
0.45	1.359	2.078	96.95
0.50	1.313	2.078	102.2
0.55	1.500	2.297	99.38
0.60	1.297	2.172	99.06
0.65	1.625	2.125	100.1
0.70	1.672	2.172	101.0
0.75	1.797	1.891	101.0
0.80	1.734	1.860	103.1
0.85	1.656	1.703	102.4
0.90	1.672	1.625	103.1
0.95	2.000	1.563	104.1

Как видно из данных табл. 2, время, затрачиваемое на расчеты, для обоих методов сопоставимое, причем оно на два порядка меньше длительности ИМ.

На рис. 7 представлены результаты расчетов для системы М/Ph/2 при $\rho = 0.85$ в зависимости от коэффициента вариации обслуживания заявок H -класса (обозначен как «с»).

На основании анализа представленных зависимостей можно сделать вывод, что относительная погрешность метода ПСР не превысила 1.5%, тогда как для метода ИО она достигает 4%. Количество итерации алгоритма ПСР линейно зависит от коэффициента вариации времени обслуживания заявок H -класса.

В табл. 3 представлены результаты измерения времени работы методов ПСР и ИО в сравнении с длительностью ИМ в секундах.

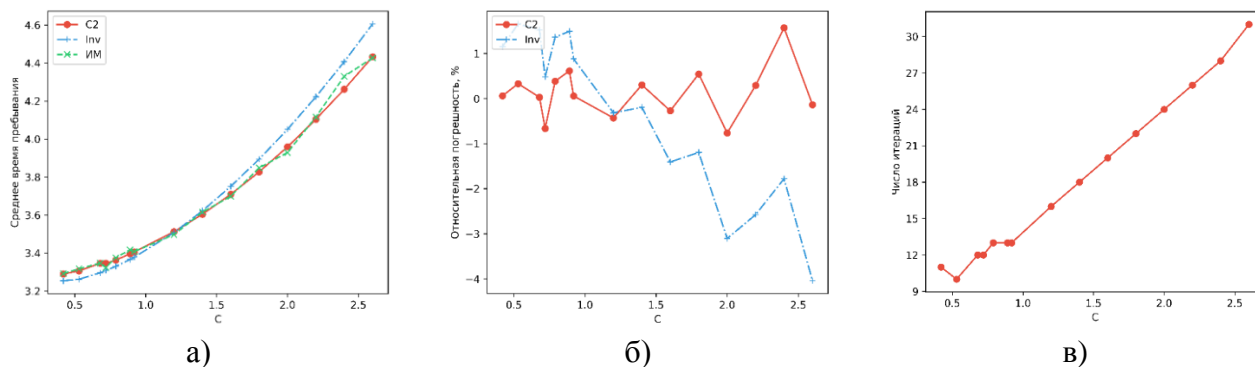


Рис. 7. Результаты расчета для $M/Ph/2$ с двумя классами в зависимости от коэффициента вариации системы «с» при $\rho = 0.85$ для исходных данных: а – среднего времени пребывания в системе; б – относительной погрешности δ , %; в – числа итераций метода ПСР

Таблица 3
Время работы методов ПСР и ИО в сравнении с длительностью ИМ при расчете СМО типа $M/Ph/2$, с

Коэффициент вариации времени обслуживания заявок H -класса	ПСР	Инов.	ИМ
0.10	1.269	1.672	103.3
0.20	1.469	1.578	110.2
0.30	1.578	1.453	104.9
0.40	1.688	1.328	121.9
0.50	1.359	0.844	112.1
0.60	1.656	0.859	115.8
0.70	3.109	0.578	117.1
0.80	1.750	0.453	110.9
0.90	1.875	0.312	116.8

Как видно из данных табл. 3, время работы методов ПСР и ИО существенно меньше времени работы ИМ при всех значениях коэффициента вариации времени обслуживания заявок H -класса. Отметим, что при приближении коэффициента вариации к единице наблюдается некоторое снижение времени работы для метода ИО.

На рис. 8 представлены результаты расчетов для системы $M/Ph/n$ при $\rho = 0.85$ и $v_H = 0.42$ в зависимости от числа каналов n .

Как можно заметить, относительная погрешность метода ПСР не превысила 1%. Для метода ИО она существенно больше – до 6%. Количество итераций алгоритма ПСР линейно зависит от n . В работе [1] были продемонстрированы результаты расчета в сравнении с мето-

дом инвариантов отношений при $\nu_H = 4$ и $\nu_H = 5$ и $\rho = 0.8$. В обоих случаях погрешность метода ПСР не превысила 2%, тогда как для метода ИО она достигала 20% в первом случае и до 40% – во втором.

Можно сделать вывод, что метод ПСР превосходит по точности метод ИО при любых коэффициентах вариации. Однако для коэффициентов вариации, меньших единицы, погрешность метода ИО существенно меньше, но все же достаточно высока, особенно с ростом коэффициента загрузки и числа каналов.

В табл. 4 представлены результаты измерения времени работы методов ПСР и ИО в сравнении с длительностью ИМ в секундах.

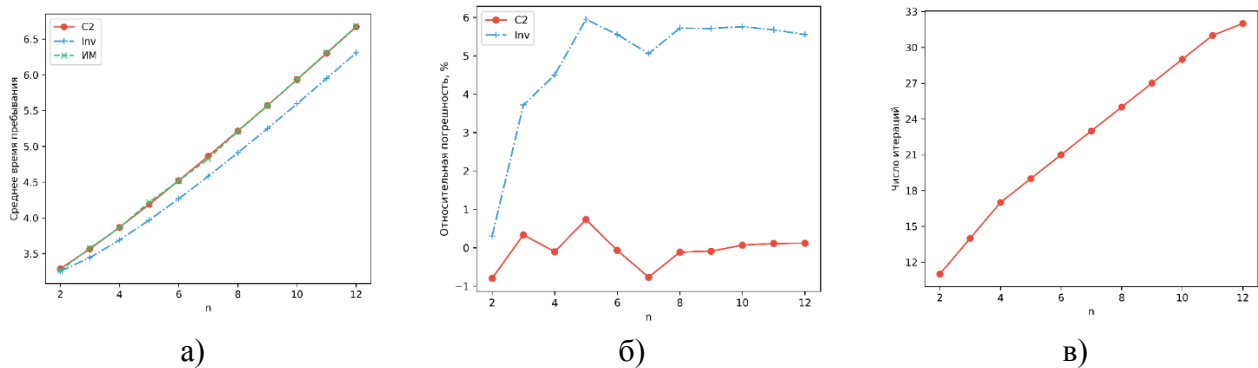


Рис. 8. Результаты расчета для $M/Ph/n$ с двумя классами в зависимости от числа каналов при $\rho = 0.85$ и $\nu_H = 0.42$ для исходных данных:
 а – среднего времени пребывания в системе; б – относительной погрешности δ , %;
 в – числа итераций метода ПСР

Таблица 4
Время работы методов ПСР и ИО в сравнении с длительностью ИМ при расчете СМО типа $M/Ph/n$, с

Число каналов n	ПСР	Инв.	ИМ
2	1.641	1.719	114.7
3	6.016	4.047	111.1
4	18.36	7.531	135.5
5	82.66	14.88	115.8
6	151.0	21.92	115.5
7	207.9	30.70	117.6
8	345.5	53.19	122.8
9	550.2	62.00	131.5
10	996.0	65.86	136.5
11	1366	85.23	134.6
12	3533	116.4	118.4

Как видно из данных табл. 4, время, затрачиваемое на расчеты методом ПСР и ИО сильно зависит от числа каналов, тогда как для ИМ оно практически постоянно. Особенно заметна зависимость от числа каналов для метода ПСР. Это связано с существенным ростом размерности матриц переходов с увеличением числа каналов. Если при $n = 2$ переходные матрицы

имеют размерность 11×11 , то для числа каналов $n = 12 - 366 \times 366$. Поэтому для получения зависимостей при числе каналов, большем пяти, имеет смысл воспользоваться ИМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлено обобщение метода ПСР, предложенного в работах [1, 21, 22] для случая произвольного коэффициента вариации времени обслуживания. Приведено сравнение результатов, получаемых методами ПСР, инвариантов отношений с результатами ИМ. Показано, что относительная погрешность метода ПСР не превысила 1,5%, тогда как для метода ИО она достигает 6%. Приведены зависимости времени расчета для методов ПСР и ИО в сравнении с ИМ.

Показано, что для небольшого числа каналов время расчетов обоими методами существенно меньше времени работы ИМ и практически не зависит от коэффициента загрузки и коэффициента вариации времени обслуживания. Однако время выполнения расчетов сильно зависит от числа каналов, тогда как для ИМ оно практически постоянно, что особенно заметно при использовании метода ПСР и вызвано ростом размерности переходных матриц. Поэтому для получения зависимостей при числе каналов, большем пяти, имеет смысл воспользоваться ИМ.

Список используемых источников

1. Multi-server queueing systems with multiple priority classes / M. Harchol-Balter [et al.] // Queueing Systems. – 2005. – Vol. 51(3). – P. 331–360.
2. Рыжиков Ю. И. Алгоритмический подход к задачам массового обслуживания: моногр. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2013. – 496 с.
3. Cobham A. Priority assignment in waiting line problems // Operations Research. – 1954. – DOI: 10.1287/opre.2.1.70
4. Kao E., Narayanan K. Modeling multiprocessor system with preemptive priorities // Management Science. – 1991. – DOI: 10.1287/mnsc.37.2.185.
5. Kao E., Narayanan K. Computing steady-state probabilities of a nonpreemptive priority multiserver queue // Journal on Computing. – 1990. – DOI: 10.1287/ijoc.2.3.211.
6. Nishida T. Approximate analysis for heterogeneous multiprocessor systems with priority jobs // Performance Evaluation. – 1992. – DOI: 10.1016/0166-5316(92)90056-M.
7. Kapadia A., Kazumi M. and Mitchell A. Analysis of a finite capacity nonpreemptive priority queue // Computers and Operations Research. – 1984. – DOI: 10.1016/0305-0548(84)90022-4.
8. Bright L. and Taylor P. Calculating the equilibrium distribution in level dependent quasi-birth-and death processes // Stochastic Models. – 1995. – DOI: 10.1080/15326349508807357.
9. Leemans H., Dedene G. Queue length and airtig times in the two-class two-server queue with nonpreemptive heterogeneous priority structures // Mathematics. – 1998. – DOI: 10.1016/S0166-5316(00)00041-9.
10. Ngo B. and Lee H. Analysis of a pre-emptive priority M/M/c model with two types of customers and restriction // Electronics Letters. – 1990. – DOI: 10.1049/ei:19900770.
11. Feng W., Kawada M. and Adachi K. Analysis of a multiserver queue with two priority classes and (M, N)-threshold service schedule ii: preemptive priority // Asia-Pacific Journal of Operations Research. – 2001. – DOI: 10.1111/j.1475-3995.2000.tb00223.x.
12. Gail H., Hantler S. and Taylor B. Analysis of a non-preemptive priority multiserver queue // Advances in Applied Probability. – 1988. – DOI: 10.2307/1427364.

13. *Gail H., Hantler S. and Taylor B.* On a preemptive Markovian queues with multiple servers and two priority classes // *Mathematics of Operations Research.* – 1992. – DOI: 10.1287/moor.17.2.365.
14. *Kao E. and Wilson S.* Analysis of nonpreemptive priority queues with multiple servers and two priority classes // *European Journal of Operational Research.* – 1999. – DOI: 10.1016/S0377-2217(98)00280-X.
15. *Mitrani I. and King P.* Multiprocessor systems with preemptive priorities // *Performance Evaluation.* – 1981. – DOI: 10.1016/0166-5316(81)90014-6
16. *Buzen J., Bondi A.* Response times of priority classes under preemptive resume in M/M/m queues // *Operations Research.* – 1983. – DOI: 10.1145/1031382.809328
17. *R. Davis.* Waiting-time distribution of a multi-server, priority queueing system // *Operations Research.* – 1966. – DOI: 10.1287/opre.14.1.133
18. *Kella O., Yechiali U.* Waiting times in the non-preemptive priority M/M/c queue // *Stochastic Models.* – 1985. – Vol. 1(2). – P. 257–262. – DOI: 10.1080/15326348508807014
19. *Bondi A. and Buzen J.* The response times of priority classes under preemptive resume in M/G/m queues // *In ACM Sigmetrics.* – 1984. – P. 195–201. – DOI: 10.1145/1031382.809328
20. *Рыжиков Ю. И., Хомоненко А. Д.* Расчет многоканальных систем обслуживания с абсолютным и относительным приоритетами на основе инвариантов отношения // *Интеллектуальные технологии на транспорте.* – 2015. – С. 11–16.
21. *Хомоненко А. Д.* Вероятностный анализ приоритетного обслуживания с прерываниями в многопроцессорных системах // *Автоматика и вычислительная техника.* – 1990. – № 2. – С. 55–61.
22. *Хомоненко А. Д.* Анализ производительности многопроцессорных систем при приоритетном обслуживании неоднородных потоков запросов // *Автоматика и вычислительная техника.* – 1991. – № 4. – С. 55–64.
23. *Хабаров Р. С., Хомоненко А. Д.* Расчет многоканальной системы массового обслуживания с прерываниями и гиперэкспоненциальными распределениями времен обработки заявок и периода непрерывной занятости // *Наукоёмкие технологии в космических исследованиях Земли.* – 2019. – Т. 11, № 5. – С. 48–56.
24. *Takahashi Y., Takami Y.* A numerical method for the steady-state probabilities of a GI/G/c queueing system in a general class. // *J. of the Operat. res. soc. of Japan.* – 1976. – Vol. 19, № 2. – P. 147–157. – DOI: 10.155807/jorsj.19.147.
25. *Neuts M.* Moment formulas for the Markov renewal branching process // *Advances in Applied Probabilities.* – 1978. – DOI: 10.2307/1425930.
26. *Алиев Т. И.* Трехмоментная аппроксимация вероятностных распределений в моделях массового обслуживания // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики.* – 2014. – № 2(90). – С. 107–110.

А. А. Авксентьев,
кандидат технических наук, доцент

МЕТОД НАИМЕНЬШЕГО ОТРЕЗКА МЕЖДУ ЛИНИЯМИ ВИЗИРОВАНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА КООРДИНАТ КОСМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА

Разработан метод расчета координат космического объекта, в процессе применения которого используется наименьший отрезок между непараллельными линиями визирования. Изложена последовательность действий для приведения направляющих косинусов двух линий визирования к единому моменту времени. Представлены зависимости для расчета координат космического объекта при одинаковых точностях определения направлений линий визирования. В зависимости от величины угла между линиями визирования, от расстояния до космического объекта и от точности измерительной аппаратуры рассчитаны ошибки вычисляемого положения центра масс космического объекта.

Ключевые слова: космический аппарат, координаты космического объекта, линия визирования, ошибки измерений.

ВВЕДЕНИЕ

Знание координат и вектора скорости необходимо для прогноза параметров движения космического объекта (КО). Эти параметры требуются при определении траектории, уровня опасности, срока активного существования и места падения КО.

В ряде случаев скорость и координаты определяются с помощью навигационной аппаратуры потребителя, но она работает лишь с объектами искусственного происхождения, во многих случаях передающими информацию ограниченному кругу потребителей.

Разработанный метод предназначен для расчета координат некооперируемого КО, который не передает параметры своего движения, но наблюдается на фоне звезд. На практике нередко возникает необходимость расчета координат такого КО. Поэтому метод является актуальным.

Наиболее близким к разработанному является метод триангуляции, который тоже может использоваться для расчета координат космических объектов в аналогичных условиях [1, 2]. Однако он более сложен в реализации и не предназначен для расчета в том случае, когда рассчитанные направления (РН) линий визирования (ЛВ) КО вследствие погрешностей измерений и вычислений не лежат в одной плоскости и поэтому не образуют треугольник. Случай параллельности РН ЛВ не рассматривается, поскольку реализация ни одного из методов в таких условиях не может привести к расчету координат.

Предлагаемый метод предназначен для расчета координат КО, визируемого на фоне звезд с двух различных ракурсов, причем РН ЛВ могут лежать в разных плоскостях. Разработанный метод превосходит метод триангуляции по оперативности получения результата и его точности в силу меньшей сложности и приспособленности к расчету в условиях, при которых рассчитанные направления линий визирования КО не образуют треугольник.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Погодные условия и загруженность каналов связи не всегда позволяют рассчитать координаты некооперируемого КО с использованием наземных измерительных средств. Поэтому

задача ставится применительно к использованию измерительных средств, размещенных за пределами атмосферы.

Пусть имеются два космических аппарата (КА) – $КА_1$ и $КА_2$ – с установленными на них камерами наблюдения (КН), способными ориентироваться и стабилизироваться в инерциальном пространстве. Оптическая ось одной из установленных на каждом КА камер определяет направление продольной оси Ox космического аппарата. Перпендикулярно оптической оси выставлена плоскость матрицы, состоящей из пикселей, строки и столбцы которой расположены в направлениях поперечных осей Oy и Oz . Направления связанных с такой КН осей O_1x_1 , O_1y_1 и O_1z_1 для $КА_1$ показаны на рис. 1.

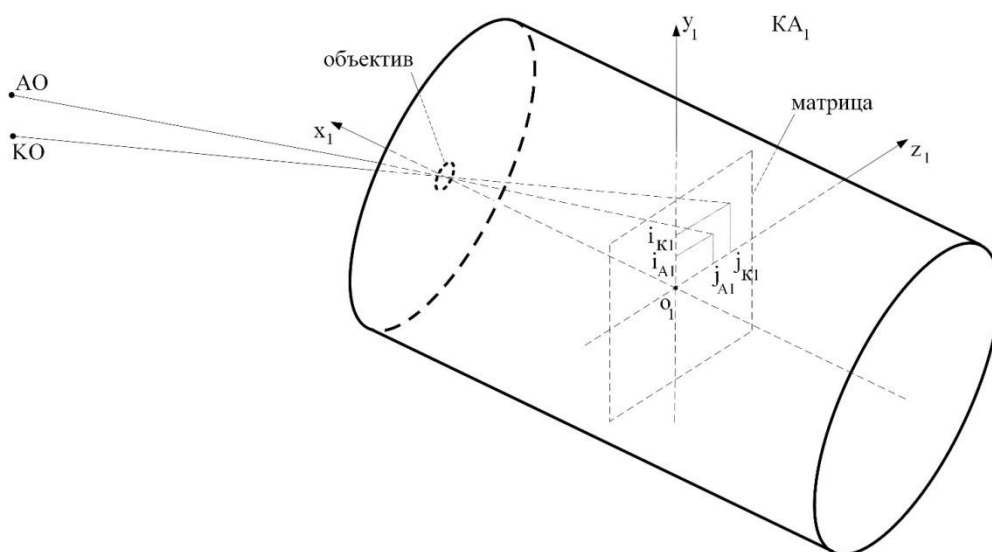


Рис. 1. Направления осей связанной с $КА_1$ системы координат

В поле зрения камер, установленных по продольным осям, наблюдается КО на фоне звезд. Требуется разработать метод расчета координат КО на основе измеренных с одинаковой точностью направлений от $КА_1$ к КО ($КА_1 - КО$) и от $КА_2$ к КО ($КА_2 - КО$).

СХЕМА РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДА

Выделение изображения космического объекта на матрице КН производится с помощью двух или большего числа последовательных снимков. При стабилизации $КА_1$ в инерциальном пространстве изображение КО на матрице КН выделяется как подвижный объект на фоне неподвижных точек, отображающих звезды.

Идентификацией в данном случае называется установление соответствия между точкой на матрице и конкретной звездой, имеющей присущее ей геометрическое положение во второй экваториальной системе координат [3]. В ней положение звезды определяется ее прямым восхождением α и склонением δ , которые указываются в каталогах, например в каталоге навигационных звезд [4].

Пусть на матрицу КН попадают изображения нескольких звезд. По их взаимному расположению каждое из изображений может быть идентифицировано. Для идентификации используются углы между направлениями на ближайшие изображения звезд.

Значения углов рассчитываются по координатам засвеченных на матрице КН пикселей. Они сравниваются с множеством теоретических значений, заранее рассчитанных по величине

нам α и δ для достаточно ярких звезд. Ограничения по яркости используемых звезд устанавливаются разработчиком на основе характеристик КН. В результате сравнений идентифицируется астроориентир (АО), представляющий собой звезду с известными величинами α и δ , попавшую в поле зрения КН.

Идентификация АО и выделение КО на фоне неподвижных звезд описываются в общих чертах, поскольку эти действия не определяют сущность разработанного метода. В дальнейшем задачи идентификации АО и выделения КО считаются решенными.

Рассмотрим сущность метода пошагово.

1) Расчет направляющих косинусов идентифицированного астроориентира.

Из каталога для идентифицированного АО берутся значения α и δ . Направляющие косинусы астроориентира в АГЭСК рассчитываются по формулам:

$$l_{1A} = \cos \alpha \cos \delta, \quad m_{1A} = \sin \alpha \cos \delta, \quad n_{1A} = \sin \delta, \quad (1)$$

где l_{1A} , m_{1A} , n_{1A} – косинусы углов между осями АГЭСК и направлением, обозначенным нижними индексами. В данном случае индексом $1A$ обозначено направление от KA_1 к АО.

2) Определение величин углов для последующих разворотов линии визирования идентифицированных астроориентиров.

Пусть в момент времени t_1 изображение КО на матрице КН оказывается смещенным относительно центра поля зрения КН на i_{K1} пикселей в направлении оси O_1Y_1 и на j_{K1} пикселей в направлении оси O_1Z_1 . Смещения изображения АО на тот же момент времени в тех же направлениях составляют i_{A1} и j_{A1} соответственно, как показано на рис. 1.

С учетом фокусного расстояния объектива F и расстояния между соседними пикселями D отклонение изображения КО от оси O_1Z_1 на i_{K1} пикселей в направлении оси O_1Y_1 означает отклонение линии визирования КО от оси O_1Z_1 в направлении оси O_1Y_1 на угол

$$\alpha_{iK1} = \arctg \frac{i_{K1} D}{F}. \quad (2)$$

Аналогично определяются величины углов:

$$\alpha_{iA1} = \arctg \frac{i_{A1} D}{F}, \quad \alpha_{jK1} = \arctg \frac{j_{K1} D}{F} \quad \text{и} \quad \alpha_{jA1} = \arctg \frac{j_{A1} D}{F}. \quad (3)$$

3) Расчет направляющих косинусов линии визирования КО с первого ракурса на момент времени t_1 .

В данном случае первым ракурсом является направление от KA_1 к КО ($KA_1 - КО$). Направляющие косинусы линии визирования $KA_1 - КО$ рассчитываются путем поворотов направления, описываемого направляющими косинусами (1) на угол $\alpha_{jK1} - \alpha_{jA1}$ вокруг оси

O_1Y_1 и на угол $\alpha_{iK1} - \alpha_{iA1}$ вокруг оси $-O_1Z_1$. Пусть расчеты производятся для момента времени t_1 . Получаемые направляющие косинусы $l_1(t_1)$, $m_1(t_1)$, $n_1(t_1)$ вычисляются с помощью программы [5], разработанной по правилам алгебры кватернионов.

4) **Расчет направляющих косинусов линии визирования КО с первого ракурса на момент времени $t_2 = t_1 + \Delta t$.**

Вычисления направляющих косинусов проводятся на каждом цикле расчетов, например, с периодом $\Delta t = 0,05$ с. На следующем цикле вычисляются новые косинусы для направления КА₁ – КО на момент времени $t_2 = t_1 + \Delta t$:

$$l_1(t_2), m_1(t_2), n_1(t_2). \quad (4)$$

Расчеты проводятся аналогично тому, как это было изложено для момента времени t_1 .

5) **Расчет направляющих косинусов линии визирования КО с борта КА₂ на момент времени $t \in [t_1, t_2]$.**

В промежутке времени от t_1 до t_2 на борту КА₂ рассчитываются направляющие косинусы линии визирования КА₂ – КО:

$$l_2(t), m_2(t), n_2(t). \quad (5)$$

Расчеты проводятся аналогично тому, как это было описано для КА₁ на момент времени t_1 .

6) **Приведение результатов к единому моменту времени $t \in [t_1, t_2]$.**

Момент времени $t \in [t_1, t_2]$ в общем случае не совпадает ни с t_1 , ни с t_2 . Направляющие косинусы, полученные на борту КА₁, пересчитываются на момент времени t с помощью интерполяций. Для первого направляющего косинуса

$$l_{1и}(t) = l_1(t_1) + \frac{l_1(t_2) - l_1(t_1)}{t_2 - t_1} (t - t_1). \quad (6)$$

Значения $m_{1и}(t)$ и $n_{1и}(t)$ рассчитываются аналогично формуле (6).

7) **Нормализация интерполированных значений.**

Интерполированные значения приводятся к единичному модулю. Первый направляющий косинус

$$l_1(t) = \frac{l_{1и}(t)}{\sqrt{l_{1и}^2(t) + m_{1и}^2(t) + n_{1и}^2(t)}}. \quad (7)$$

Два оставшихся рассчитываются аналогично выражению (7).

В дальнейшем используются значения на момент времени t , причем для краткости время не указывается.

8) **Расчет координат концов наименьшего отрезка между двумя линиями визирования.**

Параметрические уравнения линии визирования КА₁ – КО в АГЭСК имеют вид:

$$X_1 = X_{10} + l_1 p_1, \quad Y_1 = Y_{10} + m_1 p_1, \quad Z_1 = Z_{10} + n_1 p_1, \quad (8)$$

где X_{10}, Y_{10}, Z_{10} – координаты КА₁ в момент времени t . Они рассчитываются путем интерполяции соответствующих значений, имеющих на борту КА₁;

p_1 – свободный параметр.

Параметрические уравнения ЛВ КА₂ – КО имеют вид:

$$X_2 = X_{20} + l_2 p_2, \quad Y_2 = Y_{20} + m_2 p_2, \quad Z_2 = Z_{20} + n_2 p_2, \quad (9)$$

где X_{20}, Y_{20}, Z_{20} – координаты КА₂ в тот же момент времени t ;

p_2 – свободный параметр.

Если бы уравнения (8) и (9) абсолютно точно описывали направления КА₁ – КО и КА₂ – КО, то координаты КО определялись бы по точке пересечения этих направлений. Однако на практике направления определяются с ошибками, а прямые (8) и (9) в общем случае сближаются, но не пересекаются. Рассчитаем значения свободных параметров p_1^* и p_2^* , при которых ЛВ выражений (8) и (9) сближаются на минимальное расстояние.

Квадрат расстояния между любыми двумя точками прямых (8) и (9)

$$R^2 = (X_{20} - X_{10} + l_2 p_2 - l_1 p_1)^2 + (Y_{20} - Y_{10} + m_2 p_2 - m_1 p_1)^2 + (Z_{20} - Z_{10} + n_2 p_2 - n_1 p_1)^2. \quad (10)$$

Условие минимума R^2 , эквивалентное минимуму R , имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{R^2}{\partial p_1} = 0 \\ \frac{R^2}{\partial p_2} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

и приводит к значению

$$p_2^* = \frac{(l_1 l_2 + m_1 m_2 + n_1 n_2) [l_1 (X_{20} - X_{10}) + m_1 (Y_{20} - Y_{10}) + n_1 (Z_{20} - Z_{10})]}{1 - (l_1 l_2 + m_1 m_2 + n_1 n_2)} - \frac{l_2 (X_{20} - X_{10}) + m_2 (Y_{20} - Y_{10}) + n_2 (Z_{20} - Z_{10})}{1 - (l_1 l_2 + m_1 m_2 + n_1 n_2)}. \quad (12)$$

Величина p_1^* рассчитывается путем подстановки p_2^* в выражение

$$p_1^* = l_1(X_{20} - X_{10}) + m_1(Y_{20} - Y_{10}) + n_1(Z_{20} - Z_{10}) + p_2^*(l_1l_2 + m_1m_2 + n_1n_2). \quad (13)$$

Координаты точек X_1^*, Y_1^*, Z_1^* и X_2^*, Y_2^*, Z_2^* , являющиеся концами наименьшего отрезка между ЛВ $КА_1 - КО$ и $КА_2 - КО$, определяются с помощью подстановок значений p_1^* и p_2^* в уравнения (8) и (9).

9) Расчет координат центра масс космического объекта.

При равенстве точностных характеристик бортовой аппаратуры, измеряющей и рассчитывающей направления линий визирования, наиболее правдоподобными на момент времени t являются координаты КО, соответствующие середине наименьшего отрезка между линиями визирования:

$$X = 0,5(X_1^* + X_2^*), \quad Y = 0,5(Y_1^* + Y_2^*), \quad Z = 0,5(Z_1^* + Z_2^*). \quad (14)$$

Если требуется вычислить среднюю скорость КО, то координаты (14) рассчитываются для двух моментов времени, и приращения координат делятся на приращение времени.

ТОЧНОСТЬ РАСЧЕТА ПОЛОЖЕНИЯ ЦЕНТРА МАСС КОСМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА

Точность расчета положения центра масс КО зависит от ошибки ε определения направлений линий визирования $КА_1 - КО$ и $КА_2 - КО$, от расстояния Γ до КО и от угла β между линиями визирования. При определении точности полагалось, что величина ε для обеих линий визирования одинакова, а также, что $КА_1$ и $КА_2$ находятся на равных удалениях Γ от КО. Зависимости ошибки положения от ε и Γ близки к линейным, поэтому ошибка может быть выражена относительной величиной Δ , которая представлена в табл. 1.

Таблица 1

Относительная ошибка положения центра масс

β , град	10	20	30	40	50	60
Δ , 1/угл. мин.	$3,32 \cdot 10^{-3}$	$1,68 \cdot 10^{-3}$	$1,13 \cdot 10^{-3}$	$8,51 \cdot 10^{-4}$	$6,89 \cdot 10^{-4}$	$5,82 \cdot 10^{-4}$
β , град	80	100	120	140	160	180
Δ , 1/угл. мин.	$4,53 \cdot 10^{-4}$	$3,80 \cdot 10^{-4}$	$3,36 \cdot 10^{-4}$	$3,10 \cdot 10^{-4}$	$2,95 \cdot 10^{-4}$	$2,91 \cdot 10^{-4}$

Относительная ошибка менее наглядна, чем абсолютная. Чтобы пересчитать относительную ошибку в абсолютную, необходимо для используемого угла между направлениями $КА_1 - КО$ и $КА_2 - КО$ взять табличное значение Δ и умножить на выраженную в угловых минутах ошибку ε , а также на расстояние Γ . В промежутках между табличными значениями следует воспользоваться интерполяцией. Абсолютная ошибка получается в единицах измерения Γ .

Например, для $КА_1$ и $КА_2$, способных с точностью до 0,1 угловой минуты определить направление ЛВ космического объекта, находящегося от каждого из них на расстоянии 100 км при угле $\beta \approx 80^\circ$, положение центра масс КО определяется с точностью 4,5 м.

Метод триангуляции при определении координат не учитывает некомпланарность линий визирования. От этого возникает дополнительная ошибка, которая при условиях, описанных в предыдущем абзаце, составляет 2,9 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан метод наименьшего отрезка между линиями визирования, для реализации которого необходимо:

- рассчитать направляющие косинусы идентифицированных астроориентиров;
- определить величины углов для последующих разворотов линий визирования идентифицированных астроориентиров;
- рассчитать направляющие косинусы линии визирования КО с первого ракурса на момент времени t_1 ;
- рассчитать направляющие косинусы линии визирования КО с первого ракурса на момент времени $t_2 = t_1 + \Delta t$;
- рассчитать направляющие косинусы линии визирования КО со второго ракурса на момент времени $t \in [t_1, t_2]$.
- привести результаты к единому моменту времени t ;
- нормализовать интерполированные значения;
- вычислить координаты концов наименьшего отрезка между двумя линиями визирования;
- рассчитать координаты центра масс космического объекта.

Составлена таблица относительных ошибок, которые позволяют с учетом величины угла между линиями визирования, точности измерительной аппаратуры и расстояния до космического объекта, рассчитать абсолютную ошибку вычисляемого положения центра масс космического объекта.

Полученные в ходе проведенного исследования формулы отличаются от известных, которые используются при применении метода триангуляции, следующими особенностями:

- 1) существенно меньшей сложностью;
- 2) учетом некомпланарности рассчитанных направлений линий визирования КО.

Сравнение с известным методом триангуляции приводит к выводам о меньшей трудоемкости и более высокой точности результатов, получаемых с помощью разработанного метода. Предложенный метод может быть полезен при расчетах координат и вектора скорости, необходимых для определения траектории, срока существования и места падения космических объектов.

Список используемых источников

1. Половников В. И., Скутницкий В. М. Теоретические основы проектирования орбитальных систем космической триангуляции: моногр. – СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2013. – 123 с.
2. Половников В. И. Метод высокоточной космической триангуляции // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2013. – Вып. 638. – С. 5–8.

3. Большой Российский энциклопедический словарь / шеф-редакторы: Е. А. Махов, Л. И. Петровская, В. М. Смолкин. – Репр. изд. – М.: Большая Рос. энцикл., 2007–2009. – 1887 с. – URL: http://www.abc2home.ru/blog/equatorial_to_ecliptic_coordinates.html (дата обращения: 22.01.2022).

4. Морской астрономический альманах [двухлетний] / отв. редактор Г. А. Космодамианский. – Ин-т прикладной астрономии РАН, 2019-2020. – 348 с. – URL: <http://www.astromyth.ru/Astronomy/ConstellationsSchema.htm> (дата обращения: 22.01.2022).

5. Компьютерная программа для расчета проекций вектора, повернутого на заданный угол вокруг заданной оси в трехмерном пространстве: свид. о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017662461 / А. А. Авксентьев. – № 2017619383; заявл.19.09.2017; зарегстр. 08.11.2017.

К. В. Бакурский,
кандидат технических наук, доцент;
А. А. Макаров,
доктор технических наук, доцент;
Т. О. Мысливцев,
доктор технических наук, доцент;
С. В. Никифоров,
кандидат технических наук

АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ АНАЛИТИЧЕСКОЙ ГРУППОВОЙ ШКАЛЫ ВРЕМЕНИ НА ОСНОВЕ ФИЛЬТРА КАЛМАНА С АДАПТИВНЫМ РЕКУРРЕНТНЫМ ПОДБОРОМ ВЕСОВЫХ МНОЖИТЕЛЕЙ ДЛЯ ТЕКУЩЕГО ВЕКТОРА СОСТОЯНИЯ

Для повышения точности координатно-временного и навигационного обеспечения требуется постоянное совершенствование системы единого времени (СЕВ) Минобороны России, которая включает эталоны времени и частоты, а также каналы передачи сигналов точного времени. В состав СЕВ входит Государственный эталон времени и частоты (Росстандарт), реализующий национальную координированную шкалу времени UTC (SU) и центральный синхронизатор, время которого передает орбитальный сегмент системы ГЛОНАСС.

Развитие СЕВ требует создания новых наземных эталонов времени и частоты с относительной суточной нестабильностью 10^{-16} и выше; восстановления национальной системы хранения времени в виде сети первичных и вторичных эталонов, а также мобильных эталонов-переносчиков.

Сетевое распределение эталонов прежде всего должно предусматривать наличие каналов их взаимной синхронизации, обратных информационных связей, центров сбора и обработки данных о параметрах и точностных характеристиках групп эталонов, распределенных по глобальному и территориальному признаку.

Построение пространственно-распределенной системы эталонов дает возможность, в центрах сбора и обработки данных, создать программно-алгоритмические комплексы формирования аналитических групповых шкал времени (далее ГШВ), построенные по иерархическому принципу равноточных эталонов.

В работе предложен вариант рекуррентного алгоритма формирования ШВ группы рубидиевых стандартов частоты на основе адаптивного фильтра Калмана. При реализации фильтра использована методика весового суммирования полиномиальных функций при краткосрочном накоплении отфильтрованных данных ЭВЧ в группе.

Ключевые слова: аналитическая групповая шкала времени, рекуррентные вычислительные процедуры.

ВВЕДЕНИЕ

Объединение часов в группы позволяет повысить общую стабильность выходных характеристик сигналов частоты и времени [1, 3, 4, 11]. Такой подход построения шкалы времени может быть использован в инфраструктуре различных сложных радиотехнических систем и комплексов, к которым можно отнести:

– эталонные комплексы хранения и воспроизведения единиц времени, частоты и шкалы времени Государственной службы времени и частоты (ГСВЧ) и системы единого времени [2];

– объекты Государственной системы единого времени и эталонных частот «Цель», куда функционально входят наземные и бортовые системы космического комплекса системы ГЛОНАСС, а также объекты инфраструктуры МО РФ [5];

– объекты инфраструктуры специализированных подразделений РАН и др.

Перечисленные объекты и системы, локальные и пространственно-распределенные, отличаются типами применяемых в их составе часов, способами синхронизации этих часов внутри группы и способом передачи для этих систем размеров эталонных единиц времени и частоты. Высокие требования к точности и надежности согласования шкал времени заставляют

объединять часы указанных систем в группы. При этом, опираясь на результаты сличений часов внутри группы, требуется совместно оценивать параметры нестабильности часов и рассчитывать с помощью идентифицированных математических моделей нестабильностей компенсирующие поправки к уходам часов группы относительно эталонных шкал. Применение этих поправок обеспечивает согласованность шкал времени часов внутри группы, а последовательность перечисленных операций составляет алгоритм формирования шкалы группового хранителя времени.

В работе [6] в сжатом виде дан общий подход к объединению хранителей времени в группы и формированию групповых шкал. В этой же работе представлена подборка источников по данной проблематике.

Необходимо отметить, что так или иначе в большинстве работ предлагается использовать алгоритмы весового суммирования данных эталонов либо рекуррентные процедуры формирования ГШВ в реальном масштабе времени. Рекуррентные процедуры строятся, как правило, на основе алгоритмов калмановской фильтрации, но возможно использование и различных форм алгоритмов полиномиальной аппроксимации, алгоритмов, использующих «скользящее окно» при усреднении обрабатываемых данных и т. п. В этой связи предлагаемые авторами алгоритмические решения интересны прежде всего особенностями использования теорий и математического аппарата, реализующих известные подходы, которые делают рекуррентный алгоритм оригинальным.

Реализация рекуррентных алгоритмов обработки результатов измерений требует в первую очередь проведения предварительного анализа данных и получения статистических характеристик рассматриваемых процессов. В нашем случае это относится к группе СЧВ.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ

Проведем анализ данных о нестабильности шести рубидиевых СЧВ, полученных на основе долгосрочных испытаний с использованием водородного стандарта частоты. При испытаниях использован стационарный водородный стандарт частоты VCH-1005 с соответствующим программно-аппаратным комплексом разработки ЗАО «Время-Ч» (www.vremya-ch.com).

На рис. 1 представлены относительные погрешности по частоте выбранных для анализа стандартов за все время наблюдения с шагом измерений 100 с.

При анализе результатов видно, что СЧВ № 4 существенно отличается по точности от остальной группы выбранных стандартов и вследствие этого, для простоты обработки данных, будет исключен при дальнейшем анализе и построении алгоритмов.

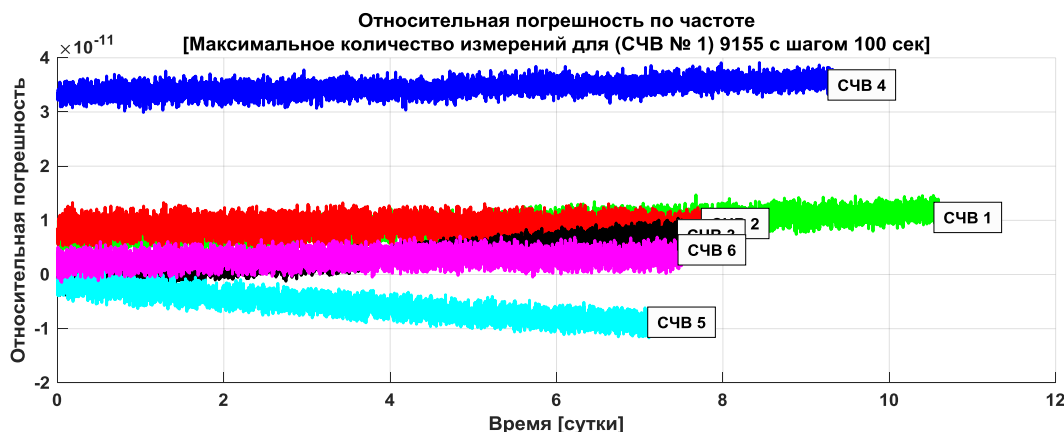


Рис. 1. Относительные погрешности по частоте для СЧВ № 1–6

Наиболее содержательными характеристиками СЧВ во временной области являются вариации Аллана и Адамара. Вариация Аллана сходится для большинства типов шумов СЧВ и нечувствительна к систематическим погрешностям, а в общем случае – эффективна для нестационарных случайных процессов [7, 8]. К преимуществам вариации Адамара можно отнести нечувствительность данной оценки к линейному дрейфу частоты, что делает ее использование наиболее оптимальным для анализа рубидиевых атомных часов.

В табл. 1 представлены статистические характеристики, применяемые при анализе СЧВ на примере СЧВ № 1 группы.

Таблица 1

Статистические характеристики, используемые при анализе СЧВ на примере СЧВ № 1 группы

Тип дисперсии	Аналитическое представление дисперсии	Время наблюдения		
		1 час	10 часов	24 часа
Стандартная (СКО)	$\sigma_y = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} (y_i - \bar{y})^2}$	$1,4 \cdot 10^{-12}$	$1,4 \cdot 10^{-12}$	$1,4 \cdot 10^{-12}$
С учетом полиномиального дрейфа (СКД)	$\sigma_y = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} (y_i - \bar{y} - \text{дрейф})^2}$	$3,1 \cdot 10^{-13}$	$1,1 \cdot 10^{-13}$	$1,2 \cdot 10^{-13}$
Вариация Аллана	$\sigma_{y(\tau)} = \sqrt{\frac{1}{2(M-1)}} \times \sqrt{\sum_{i=1}^{M-1} (y_{i+1} - y_i)^2}$	$2,2 \cdot 10^{-13}$	$1,4 \cdot 10^{-13}$	$3,0 \cdot 10^{-13}$
Вариация Адамара	$H\sigma_{y(\tau)} = \sqrt{\frac{1}{6(M-2)}} \times \sqrt{\sum_{i=1}^{M-2} (y_{i+2} - 2y_{i+1} + y_i)^2}$	$2,2 \cdot 10^{-13}$	$7,7 \cdot 10^{-13}$	$4,9 \cdot 10^{-14}$

Измерения представляются в виде

$$y_i = x + \varepsilon_i, \quad (1)$$

где y_i – значение относительной частоты из выборки N ;

\bar{y} – среднее значение относительной частоты из выборки N ;

x – истинное значение относительной частоты, формируемое стандартом частоты;

ε_i – ошибки измерений.

Для вариации Аллана и Адамара y_i – это i -е значение из M средних значений относительной частоты на интервале осреднения данных τ .

На рис. 2 представлены графики приведенных выше дисперсий для первого СЧВ в группе.

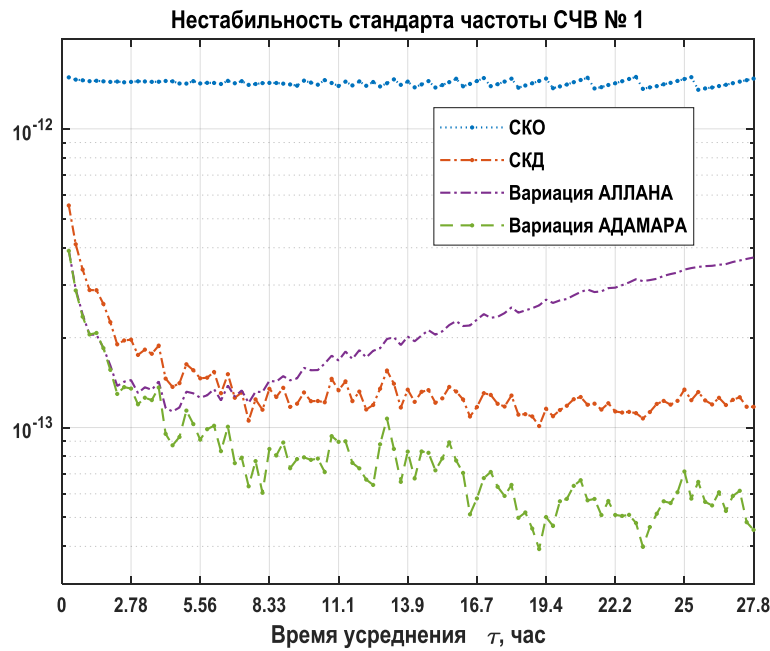


Рис. 2. Статистические характеристики СЧВ № 1

Вариацию Аллана удобно использовать для выбора интервала осреднения данных – как интервала, при котором дисперсия достигает минимального значения, поэтому в дальнейшем при реализации алгоритма калмановской фильтрации этот интервал накопления можно использовать для выбора интервала полиномиальной аппроксимации данных и построения ГШВ.

АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ФИЛЬТРА КАЛМАНА

На практике при обработке сигналов широко применяется дискретный фильтр Калмана, основанный на линейных моделях состояния и наблюдения:

$$x_k = A_k x_{k-1} + G w_k, \quad (2)$$

$$y_k = H_k x_k + v_k, \quad (3)$$

- где x_k – вектор состояния системы размерностью $n \times 1$;
- A_k – переходная матрица системы размерностью $n \times n$;
- G – матрица усиления дисперсий шума состояния системы;
- w_k – шум состояния системы;
- y_k – вектор наблюдения размерностью $m \times 1$;
- H_k – матрица наблюдения размерностью $m \times n$;
- v_k – шум наблюдений размерностью $m \times m$.

Рекуррентный процесс фильтрации задается следующими матричными разностными уравнениями [9, 10]:

1. Прогнозирование оценки вектора состояния:

$$\hat{x}_k^* = A_k \hat{x}_{k-1}, \quad (4)$$

где \hat{x}_k, \hat{x}_k^* – оценка вектора состояния системы, оптимальная по критерию минимума СКО и ее прогноз.

Для предлагаемого алгоритма фильтрации используем полиномиальную функцию второй степени. В этом случае переходная матрица системы

$$A_k = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t & \frac{\Delta t^2}{2} \\ 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

2. Прогнозирование матрицы ковариации ошибок фильтрации:

$$P_k^* = A_k P_{k-1} A_k^T + Q_k, \quad (5)$$

где P_{k-1}, P_k^* – ковариационная матрица ошибок фильтрации и ее прогноз;

Q_k – ковариационная матрица порождающего шума.

Для предлагаемого алгоритма фильтрации ковариационная матрица порождающего шума

$$Q_k = \begin{bmatrix} \frac{\Delta t^5}{20} & \frac{\Delta t^4}{8} & \frac{\Delta t^3}{6} \\ \frac{\Delta t^4}{8} & \frac{\Delta t^3}{3} & \frac{\Delta t^2}{2} \\ \frac{\Delta t^3}{6} & \frac{\Delta t^2}{2} & \Delta t \end{bmatrix} \cdot \sigma_{ш}^2,$$

где $\sigma_{ш}^2$ – спектральная плотность мощности белого шума.

3. Вычисление коэффициента усиления фильтра:

$$K_k = P_k^* H^T (H P_k^* H^T + R)^{-1}, \quad (6)$$

где H_k – матрица наблюдения $H_k = [1 \ 0 \ 0]^T$;

R – матрица корреляции относительной погрешности по частоте, представляющая собой значения дисперсии обрабатываемых измерений.

Как было указано ранее, при анализе стандартов значение дисперсии измерений можно определить, зная минимальное значения вариации Аллана для каждого из стандартов, если она не определена. Анализ результатов обработки показал, что этот интервал, в среднем, не превышает трех часов, в течение которых проводятся измерения. Поэтому значение дисперсии несложно определить при аппроксимации участков (рис. 1.1) измерений линейной либо полиномиальной функцией. Для рассматриваемых стандартов СКО измерений в среднем составляет величину $\sigma = 1.1906 \cdot 10^{-10}$ в относительных единицах частоты.

4. Вычисление оценки вектора состояния:

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^* + K_k (y_k - H_k \hat{x}_k^*), \quad (7)$$

где y_k – вектор измерений относительной погрешности по частоте.

5. Вычисление матрицы корреляции ошибок оценивания:

$$P_k = (I - K_k H_k) P_k^*, \quad (8)$$

где I – единичная матрица.

Приведенные соотношения определяют в пространстве состояний рекуррентный дискретный алгоритм фильтра Калмана. Для реализации алгоритма необходимо знание вектора начальных условий x_0 и ковариационной матрицы ошибок фильтрации P_0 в некотором априорном приближении.

Результатом работы фильтра будет оценка вектора состояния $x_k = [a_{0k} \ a_{1k} \ a_{2k}]^T$, состоящего из коэффициентов полиномиальной функции второго порядка

$$f(t_k) = a_{2k} \cdot t_k^2 + a_{1k} \cdot t_k + a_{0k}.$$

При неизвестных начальных условиях их можно приближенно найти, зная первые три измеряемых параметра из формулы (3):

$$x_0 = \left[y_1 \quad \frac{y_2 - y_1}{\Delta t} \quad \frac{y_3 - 2y_2 + y_1}{\Delta t^2} \right]^T.$$

На рис. 3 представлены результаты работы фильтра Калмана при обработке относительной погрешности по частоте для СЧВ № 1. Аналогичные результаты должны быть получены для остальных стандартов.

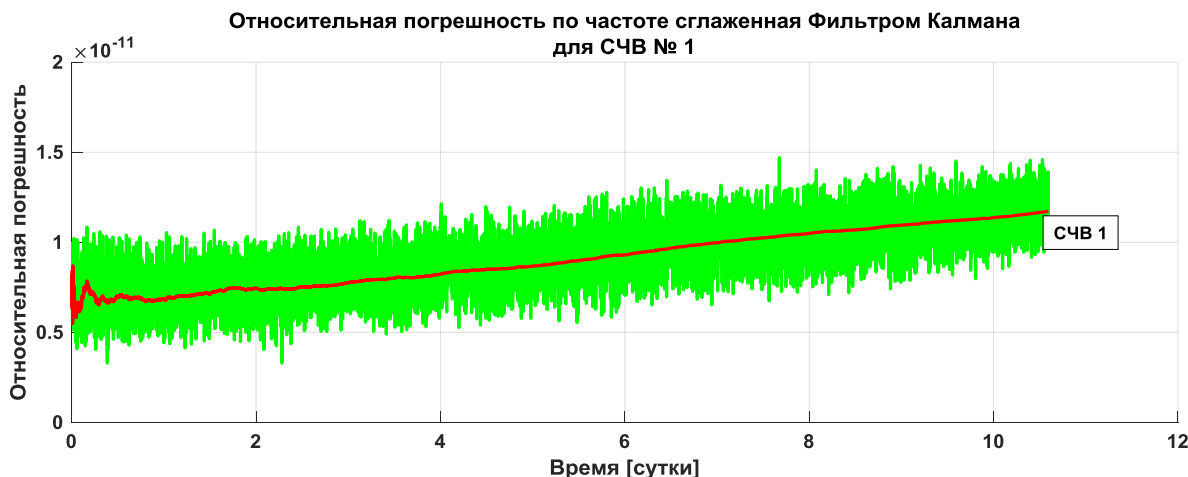


Рис. 3. Результаты работы фильтра Калмана при обработке результатов измерений СЧВ № 1 (красная линия)

В работе [12] авторами был предложен алгоритм формирования ГШВ на примере полиномиальной аппроксимации функцией второго порядка дрейфа поправок к бортовым ШВ навигационных КА, содержащихся в файлах формата RINEX-Clock. Если коротко, то суть алгоритма состоит в следующем.

Для формирования ГШВ каждому аппроксимирующему полиному необходимо добавить весовой множитель (-1) или (1) , который «отражает» либо «не отражает» полученную полиномиальную функцию относительно оси времени.

Полиномиальная функция для ГШВ отыскивается как результирующая сумма взвешенных значений полученных полиномов. Основная задача состоит в переборе полного числа вариантов весовых множителей (2^m вариантов, где m – количество стандартов в группе). В результате полного перебора значений весовых множителей отыскивается минимум целевой функции:

$$F(a_0^{CЧВ.№m}, a_1^{CЧВ.№m}, a_2^{CЧВ.№m}, faktor(k)) =$$

$$= abs \left[\sum_{k=1}^m [faktor(k) \cdot (a_2^{CЧВ.№m} \cdot t^2 + a_1^{CЧВ.№m} \cdot t + a_0^{CЧВ.№m})] \right] \rightarrow \min, \quad (9)$$

где $faktor(k)$ – весовой множитель для каждой полиномиальной функции;

$abs[\cdot]$ – абсолютное значение взвешенной суммы.

Одним из вариантов полного перебора значений предложен вариант присвоения $faktor(k) = 1$ или $faktor(k) = -1$ при переборе чисел от 0 до 2^m в двоичной форме.

При этом рекуррентность процедуры достигалась, сначала обработкой всего массива данных после накопления и, затем, при поступлении нового измерения последнее отбрасывалось (аналог скользящего окна).

В отличие от алгоритма формирования ГШВ на основе полиномиальной аппроксимации, алгоритм, построенный на основе фильтра Калмана уже является рекуррентным. Тогда основная задача при формировании ГШВ состоит в поиске весовых множителей для полиномиальных функций на каждой итерации работы фильтра Калмана, что делает его адаптируемым к измерениям.

Тогда в результате полного перебора значений весовых множителей отыскивается минимум целевой функции

$$F(a_{0k}^{CЧВ.№m}, a_{1k}^{CЧВ.№m}, a_{2k}^{CЧВ.№m}, faktor_k^{(i)}) =$$

$$= abs \left[\sum_{i=1}^m [faktor_k^{(i)} \cdot (a_{2k}^{CЧВ.№m} \cdot t^2 + a_{1k}^{CЧВ.№m} \cdot t + a_{0k}^{CЧВ.№m})] \right] \rightarrow \min, \quad (10)$$

где $faktor_k^{(i)}$ – весовой множитель для каждой полиномиальной функции на k -й итерации работы фильтра Калмана;

$abs[\cdot]$ – абсолютное значение взвешенной суммы.

На рис. 4 представлены относительные погрешности по частоте, сглаженные фильтром Калмана для СЧВ № 1–3, 5, 6 (см. рис. 1), и ГШВ, сформированной в результате работы предлагаемого алгоритма.

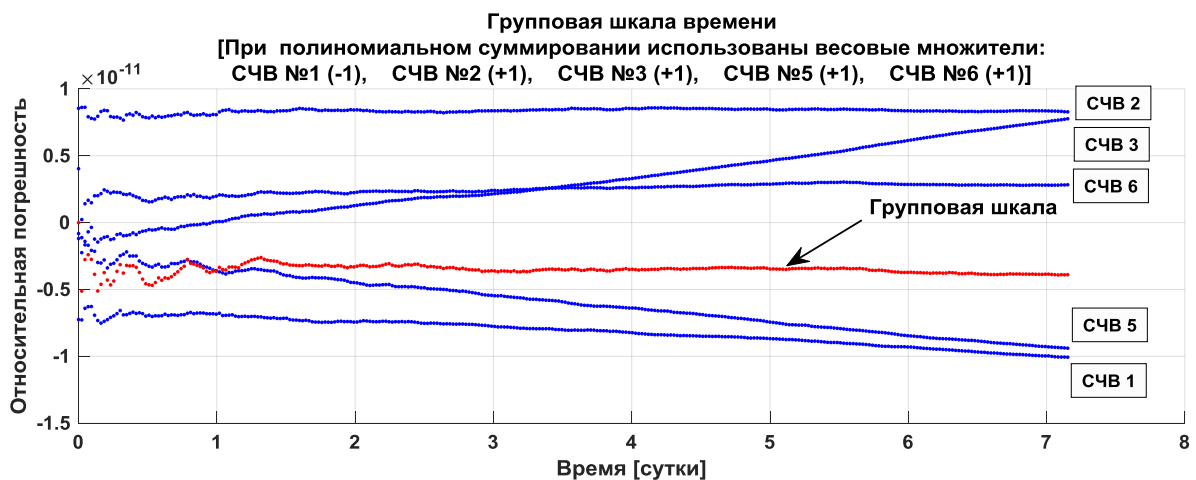


Рис. 4. Относительные погрешности по частоте, сглаженные фильтром Калмана для СЧВ № 1–6, и аналитическая ГШВ

Анализ рис. 4 показывает, что в процессе фильтрации данных существует период первоначальной нестабильности («переходный процесс») формируемой ГШВ. После завершения этого периода получены ярко выраженные линейные треки изменения относительной частоты для всех стандартов. Именно с этого момента были получены устойчивые значения весовых множителей для каждой полиномиальной функции на k -й итерации работы адаптивного фильтра Калмана (указаны в заголовке рисунка). Таким образом, для формирования ГШВ были инвертированы коэффициенты $[a_{0k} \ a_{1k} \ a_{2k}]^T$ вектора состояния только для СЧВ № 1 (можно сравнить с рис. 1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам проведенного моделирования и обработки результатов измерений относительной частоты для шести стандартов при формировании ГШВ можно сделать следующие выводы:

1. При формировании ГШВ удобно использовать оптимальные рекуррентные процедуры, в основе которых положен алгоритм дискретного фильтра Калмана, основанный на линейной модели состояния наблюдаемых процессов.

2. Предлагаемый в работе алгоритм формирования аналитической ГШВ представляет собой итерационный процесс, в котором каждая итерация содержит два больших этапа. На первом этапе (с использованием фильтра Калмана) формируются оптимальные, по критерию минимума среднего квадрата ошибки, оценки вектора состояния относительных погрешностей по частоте каждого из СЧВ группы в виде коэффициентов полиномиальной функции второго порядка. На втором этапе проводится подбор весов для элементов вектора состояния каждого СЧВ таким образом, чтобы при весовом суммировании функционал вида (10) достигал минимального значения.

3. Предлагаемый алгоритм формирует аналитическую ГШВ при обработке результатов измерений минимум трех стандартов.

4. К недостаткам предлагаемой процедуры следует отнести необходимость настройки фильтра Калмана отдельно для каждого из стандартов группы и достаточно высокую вычислительную сложность. Компенсировать второй недостаток возможно путем краткосрочного накопления отфильтрованных данных на некотором интервале времени с сохранением весовых коэффициентов для этого интервала.

5. Помимо отработки незначительных моментов и особенностей алгоритмических решений, одним из перспективных направлений исследований является разработка программно-алгоритмических комплексов, позволяющих формировать аналитическую ГШВ на базе группы одинаковых стандартов различного класса точности с использованием рекуррентных процедур оценивания.

Список используемых источников

1. Донченко С., Крошкин А. Новый подход к формированию групповой частоты и шкалы атомного времени на ансамбле хранителей // Измерительная техника. – 1989. – № 7. – С. 3–7.
2. Государственная служба времени, частоты и определения параметров вращения Земли / под ред. П. А. Красовского. – Менделеево: ВНИИФТРИ, 2007. – 163 с.
3. Шестая всероссийская конференция «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО-2015): тез. докл. – СПб.: ИПА РАН, 2015. – 200 с.

4. *Weis M., Allan D., Pepler T.* A Study of the NBS Time Scale Algorithm // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 1989. – Vol. 38, № 2. – P. 631–635.
5. *Тюляков А. Е., Белов Л. Я., Паршин П. Н.* Государственная система единого времени и эталонных частот «Цель» в части объектов и средств МО РФ: состояние и перспективы развития // Труды Института прикладной астрономии РАН. – 2018. – Вып. 44.
6. *Ханыкова Е. А.* Разработка и исследование алгоритмов оценивания параметров нестациональности бортовых часов навигационных спутников ГЛОНАСС по данным траекторных измерений 05.12.14: учеб. пособие. – Новосибирск: Сибирский гос. ун-т, 2016. – 104 с.
7. *Siraya T. N.* Statistical Interpretation of Allan Variance as a Characteristic of Measurements and Navigation Devices // *Giroskopiya i Navigatsiya*. – 2020. – Vol. 28, № 1(108). – P. 3–18.
8. *Riley W.* Handbook of Frequency Stability Analysis. – 2007. – 158 p.
9. Теория фильтрации Калмана: пер. с англ. – М.: Мир, 1988 – 168 с.
10. *Синицын И. Н.* Фильтры Калмана и Пугачева: учеб. пособие. – М.: Университетская книга, Логос, 2006. – 640 с.
11. Алгоритм формирования групповой шкалы времени эталона частоты и времени / С. Д. Подогова [и др.] // Измерительная техника. – 2015. – № 5. – С. 40–45.
12. Метод формирования групповой шкалы времени радиотехнических комплексов на основе адаптивной полиномиальной аппроксимации данных / К. В. Бакурский [и др.] // Известия вузов. Приборостроение. – 2022. – Т. 65, № 4. – С. 271–279.

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

СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ПРИЕМНИКОВ ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ С РАСШИРЕНИЕМ СПЕКТРА ПСЕВДОСЛУЧАЙНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬЮ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ФИЛЬТРА-КОМПЕНСАТОРА ПОМЕХ

Рассмотрен способ повышения помехоустойчивости приемников сигналов с расширением спектра методом непосредственной модуляции несущей псевдослучайной последовательностью (ПСП) на основе применения фильтра-компенсатора помех. Предлагаемый способ основан на выделении помеховой составляющей из смеси сигнала и помехи с последующей ее компенсацией на входе приемника. Проведена оценка результативности рассматриваемого способа для различных параметров действующих сигналов и помех.

К основным исследуемым параметрам относятся: значения средней мощности и базы сигнала (длина ПСП), а также дисперсия, ширина спектра и тип помехового воздействия. При этом в качестве показателя результативности фильтра-компенсатора выбрано отношение значений дисперсии помехи на входе решающего устройства приемника без использования фильтра-компенсатора к дисперсии помехи на входе решающего устройства приемника при использовании указанного устройства.

Ключевые слова: фильтр-компенсатор помех, помехоустойчивость, расширение спектра, псевдослучайная последовательность.

ВВЕДЕНИЕ

Основным направлением обеспечения помехозащищенности современных систем радиосвязи, которые функционируют в условиях сложной сигнально-помеховой обстановки, является применение сигналов с расширением спектра методом непосредственной модуляции несущей псевдослучайной последовательностью.

Вопросам помехозащищенности систем связи с фазоманипулированными широкополосными сигналами посвящено множество публикаций, например работы [1, 2, 8]. Вместе с тем внедрение в современных системах радиосвязи быстродействующей микропроцессорной техники (программируемых логических интегральных схем) способствует широкому применению алгоритмов адаптивной цифровой фильтрации с целью повышения помехозащищенности подобных систем связи, особенно в условиях нарастающего усложнения сигнально-помеховой обстановки.

Необходимо отметить, что адаптивно-цифровая фильтрация предусматривает использование различных типов цифровых фильтров (линейных предсказывающих, трансверсальных, рекурсивных и др.), в основу работы которых положены принципы прогнозирования значений помехи с последующим вычитанием этого значения из смеси сигнала и помехи на входе приемника. Подобные фильтры достаточно эффективны по отношению к действию мощных узкополосных помех, но малопригодны для борьбы с широкополосными помехами с относительно равномерной характеристикой спектральной плотности мощности. В связи с этим задача разработки способа защиты приемников фазоманипулированных сигналов с расширением спектра псевдослучайной последовательностью, позволяющего эффективно устранять влияние не только узкополосных, но и широкополосных помех, является актуальной.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для решения поставленной задачи предлагается разработать устройство в виде фильтра-компенсатора помехи. Принцип действия такого устройства основан на компенсации, вычитании из действующей на входе приемника помехи некоторой ее копии, воссозданной из действующей на входе приемника смеси сигнал-помеха в результате применения последовательности операций. К таким операциям относятся:

- 1) сужение спектра (свертки) сигнала с одновременным расширением спектра помехи (в результате умножения смеси сигнал-помеха на ПСП);
- 2) узкополосная фильтрация (удаление) свернутого (сосредоточенного в узкой полосе частот) сигнала из помехи с расширенным спектром;
- 3) последующее сужение отфильтрованной помехи с расширенным спектром – воссоздания помехи (за счет повторного умножения помехи с расширенным спектром на ПСП).

Таким образом, рассматриваемое устройство может быть определено как фильтр-компенсатор, действие которого заключается в реализации операции фильтрации узкополосным фильтром полезного сигнала после его сжатия, с последующим восстановлением (расширением) отфильтрованного процесса (действующей помехи) и его удаления (компенсации) из входного процесса.

Структурная схема предлагаемого устройства представлена на рис. 1. С учетом сложности задачи аналитического описания и оценки результатов применения указанного устройства в данной работе предлагается использовать метод имитационного моделирования. Так, в среде программирования *Matlab* разработана имитационная модель, реализующая всю необходимую последовательность операций преобразования сигналов и помех, реализующих рассматриваемый способ.

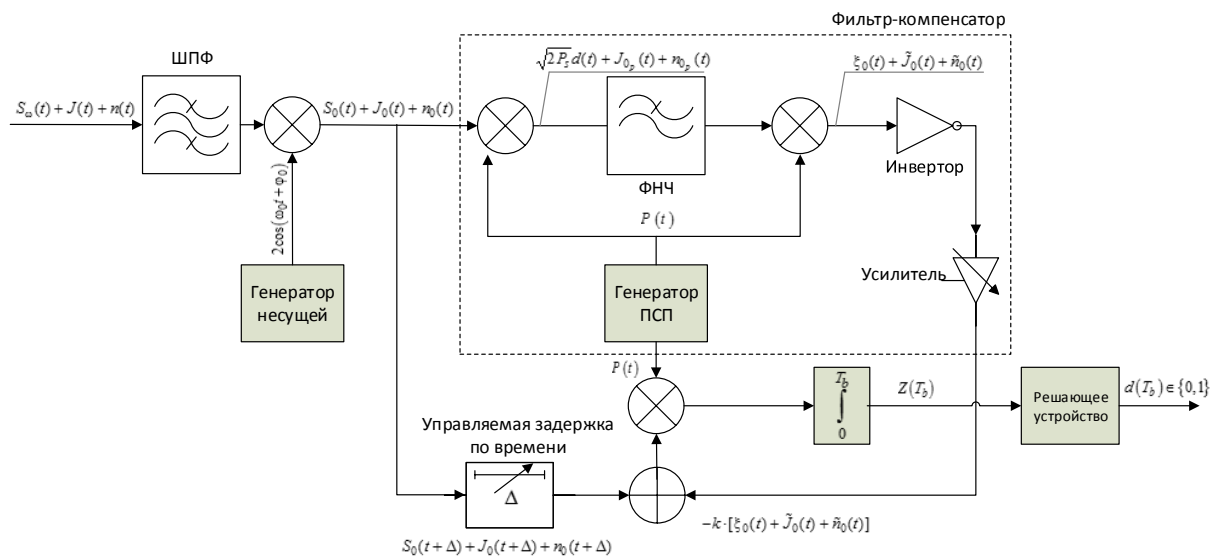


Рис. 1. Структурная схема способа (где ШПФ – широкополосный фильтр, ФНЧ – фильтр нижних частот)

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ

Пусть на вход широкополосного фильтра поступает смесь сигнала $S(t)$, помехи $J(t)$ и шумов $n(t)$.

Математическая модель сигнала может быть описана следующим выражением:

$$S(t) = \sqrt{2P_S} d(t) p(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0),$$

- где P_S – мощность сигнала;
 $d(t)$ – информационный сигнал в виде процесса меандрового типа в пределах $(-1,1)$ на интервале длительности сообщения;
 $p(t)$ – расширяющая псевдослучайная последовательность в виде процесса меандрового типа в пределах $(-1,1)$ на интервале длительностью одного бита.

Наиболее распространенной помехой является так называемая гауссовская помеха с ограниченным и равномерным спектром в заданной полосе частот. Математическая модель такой помехи может быть описана следующим выражением:

$$J(t) = A(t) \cos(\omega_J t + \varphi(t)).$$

Здесь $A(t)$ – закон амплитудной модуляции $A(t) = \sqrt{2P_J} g(t)$, который для рассматриваемого типа помехи представлен случайным процессом $g(t)$ с рэлеевской плотностью распределения (P_J – мгновенная мощность стационарного процесса), при этом

$$W(g) = \frac{g}{\sigma_0^2} e^{-g^2/2\sigma_0^2},$$

где математическое ожидание

$$m_g = \sqrt{\pi/2} \sigma_0$$

и среднеквадратическое отклонение

$$\sigma_g = (2 - \pi/2) \sigma_0^2;$$

$\varphi(t)$ – закон угловой (частотной или фазовой) модуляции этого же произвольного сигнала, который для рассматриваемого типа помехи представлен случайным процессом с равномерным распределением в интервале $\varphi(t) \in (0, 2\pi)$; здесь математическое ожидание $m_\varphi = \pi$ и среднеквадратическое отклонение $\sigma_\varphi = \pi/\sqrt{3}$;

ω_J – частота помехи, которая находится в пределах полосы пропускания приемника.

Автокорреляционная функция помехи определяется как

$$R_J(t-s) = E\{J(t)J(s)\} = P_J \frac{\sin\left[\frac{W_1}{2}(t-s)\right]}{\left[\frac{W_1}{2}(t-s)\right]} \cos(\omega_J(t-s)),$$

где W_1 – ширина полосы помехи.

По условию помеха $J(t)$ обладает равномерным энергетическим спектром в пределах полосы W_1 . То есть

$$s_J(\omega) = \begin{cases} \frac{\pi P_J}{W_1}, & |\omega \pm \omega_J| \leq \frac{W_1}{2} \\ 0, & |\omega \pm \omega_J| > \frac{W_1}{2} \end{cases}.$$

Программная модель помехи $J(t)$ реализована на основе набора статистики заданной длины с применением генератора некоррелированных центрированных случайных чисел с равномерным законом распределения в интервале $[-1, 1]$ (рис. 2) и шагом дискретизации

$$\Delta t \leq \frac{1}{2(\omega_J + W_1/2)}.$$

При этом значения временных отсчетов помехи (рис. 3–5) получаются путем обратного преобразования Фурье (рис. 5) от случайного амплитудного спектра (рис. 4), полученного как результат отсечения прямоугольной АЧХ идеального фильтра в заданной полосе частот $[\omega_j \pm W_1/2]$ случайного амплитудного спектра исходной сгенерированной последовательности некоррелированных случайных чисел (рис. 3).

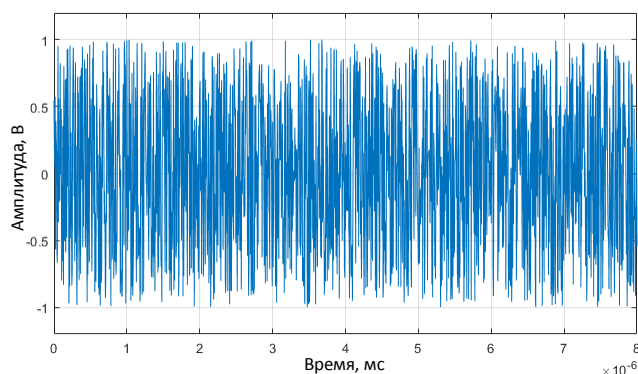


Рис. 2. Временное представление последовательности некоррелированных случайных чисел

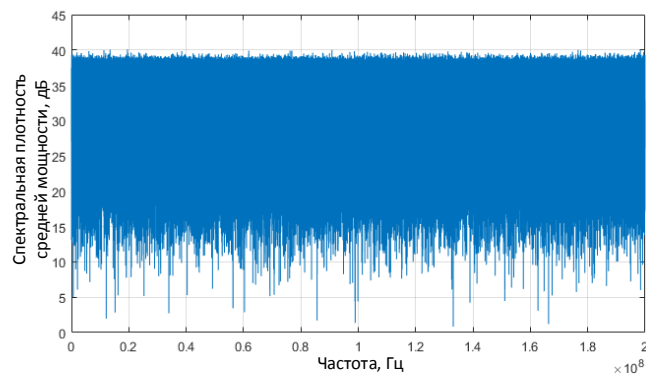


Рис. 3. Спектральное представление последовательности некоррелированных случайных чисел

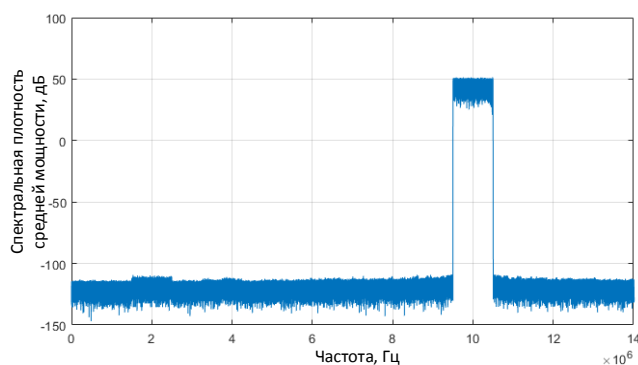


Рис. 4. Спектр помехи после фильтрации

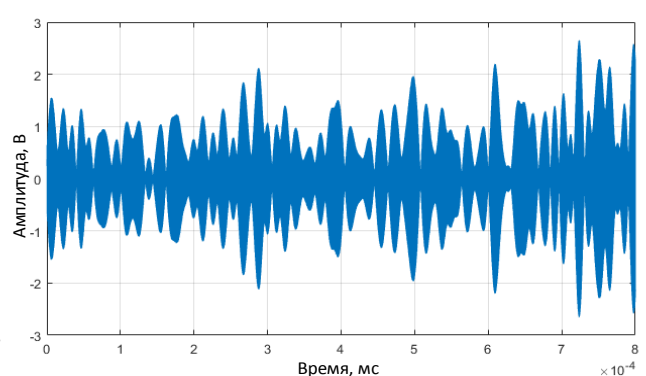


Рис. 5. Временные значения помехи после обратного преобразования Фурье

Во временной области математические модели помехи и шума, полученные с применением генератора некоррелированных центрированных равномерно распределенных случайных чисел в интервале $[-1, 1]$, могут быть представлены в виде следующих соотношений [2]:

$$J(t) = \frac{\sqrt{2P_j}}{\sqrt{N_0 \cdot W_1}} \int_0^{\infty} h_{W_1}(t - \tau) \cdot n(\tau) d\tau,$$

$$n_{W_s}(t) = \frac{\sqrt{2P_w}}{\sqrt{N_0 \cdot W_s}} \int_0^{\infty} h_{W_s}(t - \tau) \cdot n(\tau) d\tau,$$

где $h_w(t)$ – импульсная переходная характеристика формирующего фильтра, в качестве которого выступает идеальный фильтр с прямоугольной амплитудно-частотной характеристикой. Такая импульсная характеристика определяется формулой

$$h_w(t) = \frac{W}{\pi} \frac{\sin[(W/2)t]}{[(W/2)t]} \cos(\omega t),$$

где W – ширина полосы помехи W_1 или сигнала W_S в зависимости от рассматриваемой модели;

ω – центральная частота помехи ω_J или сигнала ω_0 в зависимости от рассматриваемой модели.

N_0 – спектральная плотность мощности БГШ;

$n(\tau)$ – набор статистики заданной длины с применением генератора некоррелированных центрированных равномерно распределенных случайных чисел в интервале $[-1,1]$ (рис. 2) и шагом дискретизации

$$\Delta t \leq \frac{1}{2(\omega_J + W_1/2)}.$$

При проведении исследований средняя мощность шума $P_{ш}$ считалась фиксированной величиной.

После прохождения широкополосного фильтра смесь сигнала, помехи и шумов умножается на несущую (операция понижения частоты). Далее обработка входного процесса разбивается на направления (два канала приема). Первое направление представляет собой специальную обработку входной смеси сигнал-помеха (шум), которая включает в себя ряд операций в первом канале приема:

– умножение входной смеси на образующую псевдослучайную последовательность $p(t)$ [результатом этой операции являются сужение спектра сигнала (удаление ПСП) до значения, соответствующего исходному информационному сигналу (рис. 6), и расширение спектра помехи и шума];

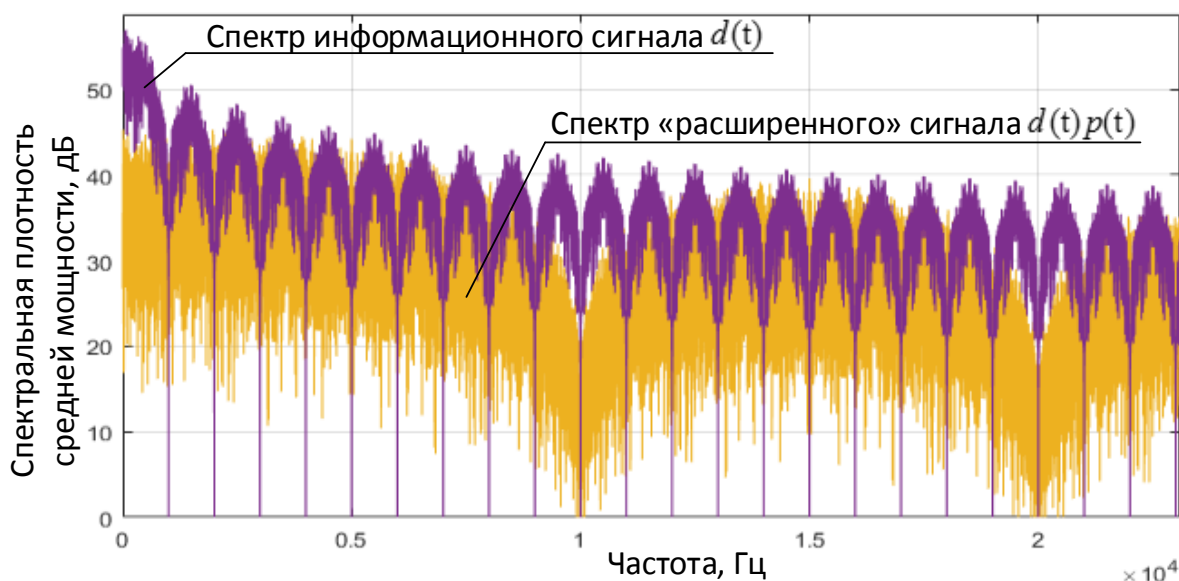


Рис. 6. Спектры информационного и «расширенного» сигналов

– фильтрацию (удаление из входной смеси суженного сигнала плюс помеха и шум с расширенным спектром) информационного сигнала фильтром нижних частот с заданной полосой (рис. 7);

– повторное умножение отфильтрованной смеси на образующую ПСП (обратное расширение спектра отфильтрованного сигнала и сужение спектра помехи и шума с расширенным спектром (восстановление помехи));

– инвертирование, усиление и сложение восстановленной помехи с входной смесью «сигнал-помеха» (шум), поступающей с устройства задержки во втором канале приема.

Во втором канале приема входной процесс подвергается только задержке по времени с целью последующего синхронного сложения с отфильтрованным и инвертированным процессом первого канала. После суммирования процессов с выхода обоих каналов приема на входе устройства принятия решения приемника формируется сигнал, «очищенный» (с различной глубиной) от помех и шумов. Таким образом, именно «очищенный», а не зашумленный сигнал используется в устройстве принятия решения о содержании переданной информации, что и составляет основу способа повышения помехоустойчивости для рассматриваемого типа приемника.

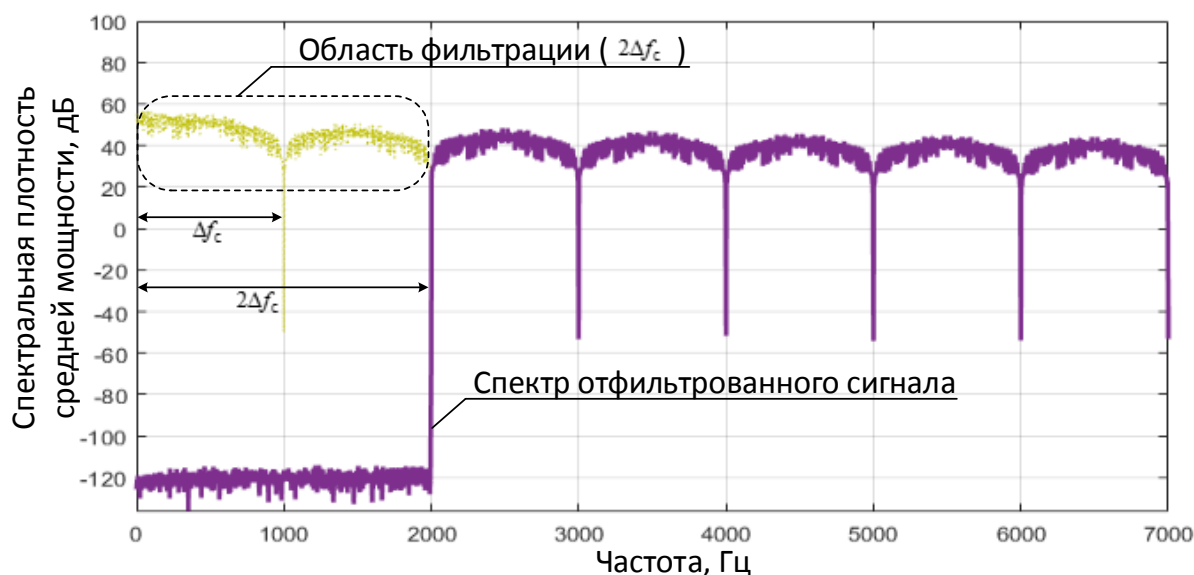


Рис. 7. Спектр отфильтрованного информационного сигнала

Необходимо отметить, что после суммирования принятого информационного сигнала с отфильтрованным и инвертированным процессом появляются методические искажения, уровень и характер которых определяются шириной полосы фильтрации. Экспериментально установлено, что полоса фильтрации, обеспечивающая «приемлемое» методическое искажение (рис. 8) итогового сигнала и максимизирующая выигрыш применения фильтра-компенсатора помех, составляет $2\Delta f_c$.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ

Для оценивания эффективности применения фильтра-компенсатора проведен ряд вычислительных экспериментов, результаты которых представлены на рис. 9–12. Эффективность применения способа может быть оценена различными показателями, основными из которых являются: степень снижения вероятности битовой ошибки и коэффициент выигрыша в от-

ношении сигнал/помеха при использовании фильтра-компенсатора помех [1]. В работе выбран второй показатель, который рассчитывается как

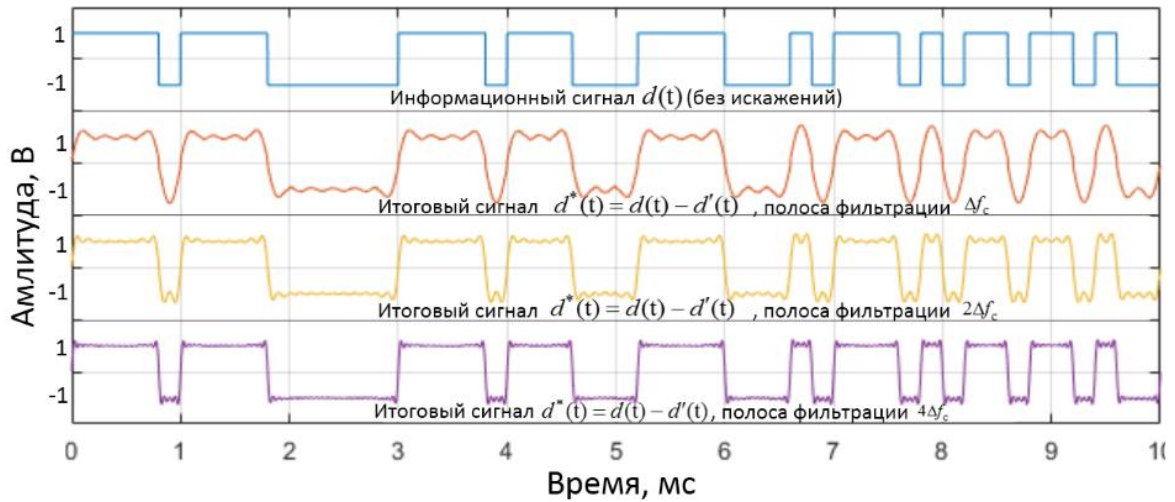


Рис. 8. Временное представление отфильтрованного информационного сигнала

$$\eta = 10 \log_{10} \left(\frac{q_1}{q_2} \right), \text{ дБ}$$

где q_1 – отношение средней мощности сигнала к дисперсии помехи на входе решающего устройства рассматриваемого приемника при использовании фильтра-компенсатора помех;

q_2 – отношение средней мощности сигнала к дисперсии помехи на входе решающего устройства обычного приемника, т. е. без использования фильтра-компенсатора помех.

На рис. 9 представлены графики зависимостей коэффициента выигрыша от отношения ширины полосы помехи к ширине полосы сигнала для прицельной ($f_{\text{п}} = f_c$) и смещенной ($f_{\text{п}} = f_c + 0,5\Delta f_c$) по частоте помех при различных значениях базы широкополосного фазоманипулированного сигнала.

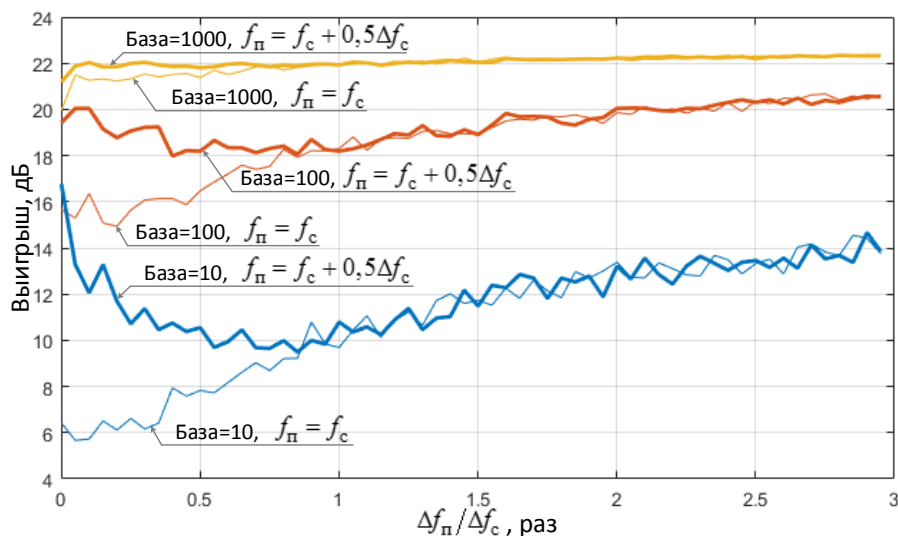


Рис. 9. График зависимостей коэффициента выигрыша от отношения ширины полосы помехи к ширине полосы сигнала

Из анализа представленного графика можно сделать вывод, что чем больше база сигнала, тем больше выигрыш. При значениях базы сигнала от 10 до 500 для прицельной по частоте помехи выигрыш растет по мере увеличения полосы помехи. При этом для смещенной по частоте помехи максимальный выигрыш достигается в случае узкополосной помехи ($\Delta f_n / \Delta f_c < 0,1$). В интервале значений полосы помехи $0,1 < \Delta f_n / \Delta f_c < 1$ выигрыш уменьшается, а при $\Delta f_n / \Delta f_c \geq 1$ выигрыша совпадает со значениями выигрыша прицельной по частоте помехи. Для сигналов, база которых больше 500, смещения помехи по частоте не оказывают существенного воздействия на итоговый выигрыш.

На рис. 10 и 11 представлены графики зависимостей коэффициента выигрыша от расстройки между частотой помехи и сигнала для помех с шириной полосы $\Delta f_c = \Delta f_n$ (рис. 10) и $\Delta f_n = 1$ Гц (рис. 11) при различных значениях базы фазоманипулированного сигнала. Анализ представленных зависимостей позволяет сформулировать следующие выводы: для прицельной по частоте помехи с полосы, соизмеримой с шириной спектра сигнала, итоговый выигрыш оказывается на 4-5 дБ больше, чем для узкополосной помехи. Существенные колебания итогового выигрыша (≈ 12 дБ для узкополосной помехи, ≈ 7 дБ для помехи с полосой $\Delta f_c = \Delta f_n$) наблюдаются для сигналов с базами 10–100 при отстройках частоты помехи в пределах $-2\Delta f_c \leq f_n \leq 2\Delta f_c$; для сигналов с базой более 500 итоговый выигрыш несущественно зависит от отстройки помехи по частоте.

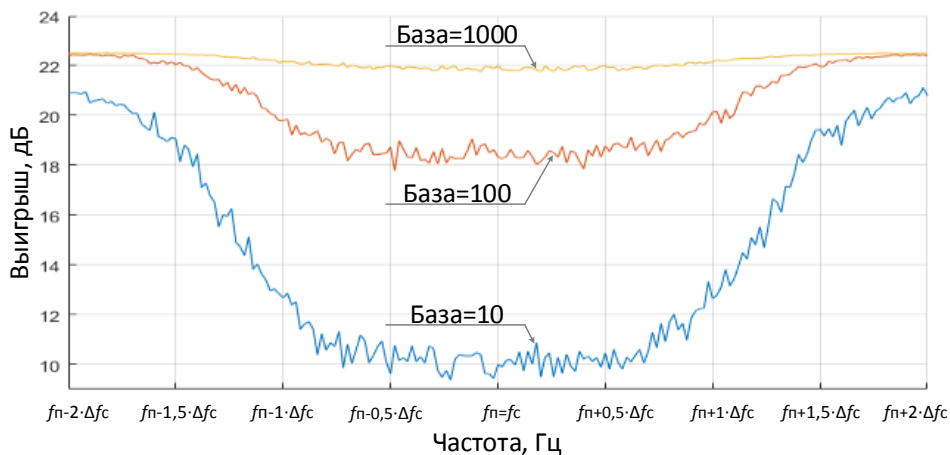


Рис. 10. График зависимостей коэффициента выигрыша от расстройки между частотой сигнала и частотой помехи (для помехи с полосой $\Delta f_n = \Delta f_c$)

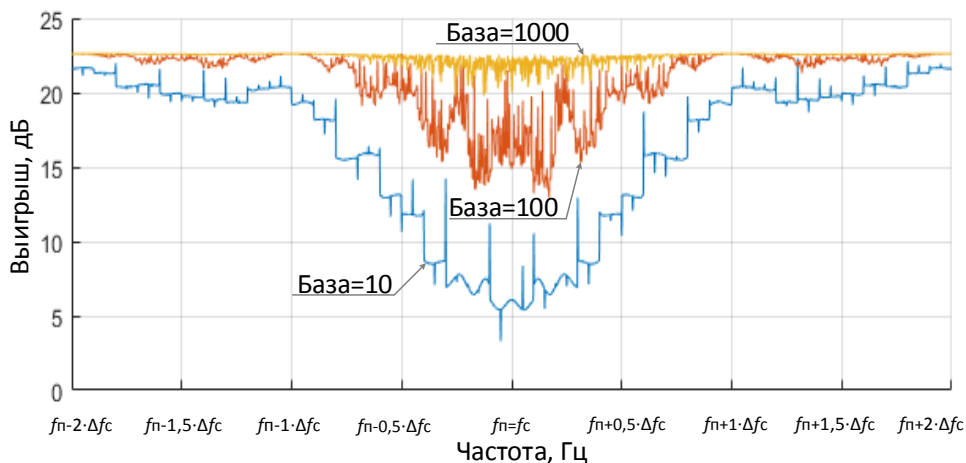


Рис. 11. График зависимостей коэффициента выигрыша от расстройки между частотой сигнала и частотой помехи (для помехи с полосой $\Delta f_n = 1$ Гц)

На рис. 12 представлены графики зависимостей коэффициента выигрыша от отношения мощности помехи к мощности сигнала для различных значений базы фазоманипулированного сигнала.

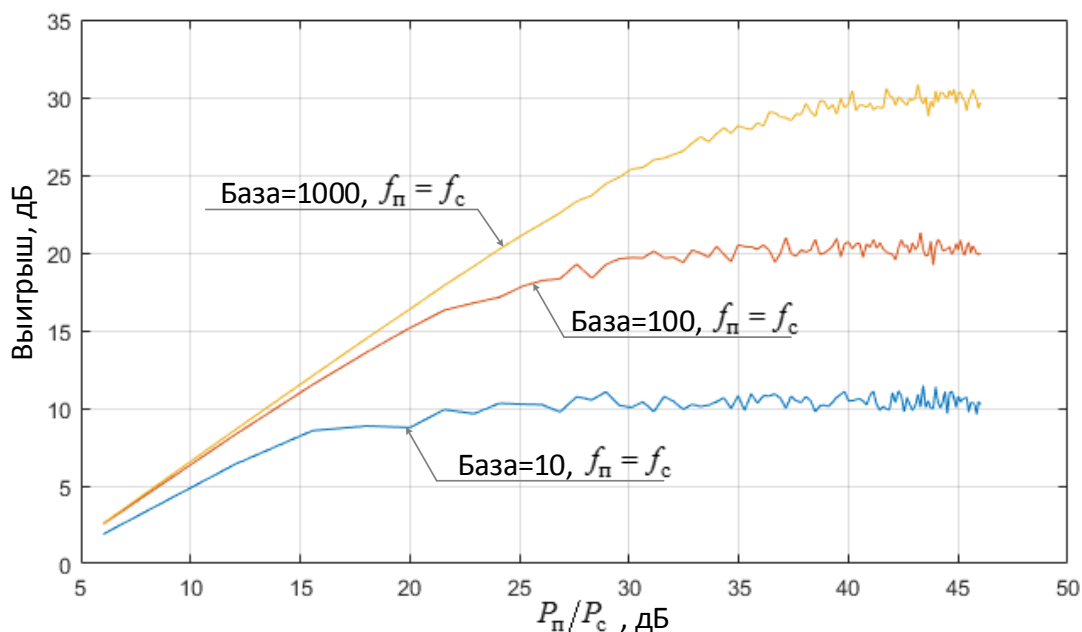


Рис. 12. График зависимостей коэффициента выигрыша от отношения мощности помехи к мощности сигнала

Из рисунка видно, что по мере увеличения мощности помехи растет выигрыш, при этом наблюдается «порог насыщения», после которого коэффициент выигрыша существенно не изменяется. Для сигналов с базами 10, 100, 1000 значение порогов составили 20, 3 и 40 дБ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенной работы предложен способ повышения помехоустойчивости приемников фазоманипулированных сигналов с расширением спектра псевдослучайной последовательностью. Способ основан на выделении помеховой составляющей из смеси сигнала и помехи с последующей ее компенсацией. Кроме того, разработана имитационная модель фильтра-компенсатора помех, проведен ряд вычислительных экспериментов по оценке эффективности указанного устройства, результаты которых представлены на рис. 9–12. Полученные результаты позволяют сформулировать следующие выводы:

- полоса фильтрации информационного сигнала, обеспечивающая рациональное применение способа составляет $2\Delta f_c$;
- чем больше база сигнала и ширина спектра помехи, тем больше коэффициент выигрыша;
- для узкополосной прицельной по частоте помехи коэффициент выигрыша значительно (на 4–5 дБ) меньше, чем для помех с полосой, соизмеримой с шириной спектра сигнала;
- расстройка между несущими частотами сигнала и помехи в пределах $-2\Delta f_c \leq f_n \leq 2\Delta f_c$ оказывает существенное влияние на коэффициент выигрыша для сигналов с базами 10–500. При этом колебания итогового выигрыша для узкополосных помех в указанном интервале частот составили ≈ 12 дБ, для помехи с полосой $\Delta f_c = \Delta f_n$ составили ≈ 7 дБ;
- для сигналов с базой более 500 итоговый выигрыш несущественно зависит от отстройки частоты помехи от частоты сигнала;

– по мере увеличения мощности помехи растет коэффициент выигрыша, однако по достижении $P_n/P_c = \text{база сигнала (дБ)} + 10 \text{ дБ}$ наблюдается «порог насыщения» и дальнейшее увеличение мощности помехи не влияет на итоговый выигрыш.

Список используемых источников

1. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов модуляцией несущей псевдослучайной последовательностью / В. И. Борисов [и др.]; под ред. В. И. Борисова. – М.: Радио и связь, 2003. – 640 с.

2. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение: пер. с англ. – Изд. 2-е, испр. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.

3. Быков В. В. Цифровое моделирование в статистической радиотехнике. – М.: Сов. радио, 1971. – 328 с.

4. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. – СПб.: Питер, 2002. – 608 с.

5. Marvin K. Simon, Mohamed-Slim Alouini Digital Communication over Fading Channels: A Unified Approach to Performance Analysis. – John Wiley & Sons, Inc., 2000. – 551 p.

6. Антипенский Р. В., Змий Б. Ф. Моделирование сигналов и их преобразований в линейных цепях. – Воронеж: ВАИУ, 2008. – 361 с.

7. Richard C. Jaffe Random Signals for Engineers Using MATLAB and Mathcad. – Springer – Verlaq, 2000. – 376 p.

8. Вознюк В. В., Фомин А. В. Исследование помехоустойчивости приемника сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией в условиях воздействия помех с различной структурой // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 671. – С. 120–127.

В. И. Горбулин*,
доктор технических наук, профессор;
С. А. Поляков**,
кандидат технических наук;
А. А. Скопцов***

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

**Аппарат коллегии Военно-промышленной комиссии РФ, г. Москва.

***ФГБУ 27 ЦНИИ МО РФ, г. Москва.

УЧЕТ КРИТИЧЕСКИХ ЭТАПОВ ПРОХОЖДЕНИЯ СПУТНИКОМ ТЕНЕВЫХ УЧАСТКОВ ОРБИТЫ ПРИ ОБОСНОВАНИИ ОРБИТАЛЬНОГО ПОСТРОЕНИЯ ВЫСОКООРБИТАЛЬНЫХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИССИММЕТРИЧНЫХ ПОЛИСТРУКТУР

В отличие от низких орбит, для которых характерно достаточно равномерное чередование освещенных и теневых участков орбиты, средние и высокие орбиты характеризуются наличием совокупности бестеневых этапов полета КА продолжительностью до нескольких месяцев. Эти этапы сменяются критическими с многочисленными достаточно длительными интервалами времени прохождения тени Земли. Исследуется периодичность и продолжительность критических этапов прохождения спутником многочисленных теневых участков орбиты. Рассматриваются особенности класса диссимметричных баллистических структур. Рассматриваются возможности учета критических этапов при обосновании облика перспективных высокоорбитальных космических систем на базе диссимметричных полиструктур.

Ключевые слова: орбитальная группировка, высокоорбитальный сегмент, баллистическая полиструктура, класс диссимметричных баллистических структур, беспроводная передача энергии.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время средне- и высокоорбитальные построения космических группировок становятся всё более востребованными: продолжают развиваться системы различного назначения на геостационаре, совершенствуются телекоммуникационные и обзорные комплексы на наклонных высокоэллиптических, геосинхронных односторонних орбитах, исследуются различные варианты наращивания Глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС, в том числе с использованием суточных орбит. В ряде случаев (например, при обосновании дополнительного сегмента системы ГЛОНАСС) требуется использование баллистических полиструктур.

Низкие орбиты характеризуются достаточно равномерным чередованием освещенных и теневых участков орбиты (за исключением некоторых видов солнечно-синхронных орбит), а средние и высокие орбиты – наличием совокупности бестеневых этапов полета КА продолжительностью до нескольких месяцев. После этого наступает этап длительностью в несколько недель чередования освещенных и теневых участков, которые могут продолжаться несколько десятков минут и более. Для функционирования бортовой системы электроснабжения и, как следствие, для остальных бортовых комплексов и космического аппарата в целом указанный этап является критически важным, поскольку в это время возможности по выполнению целевых задач ограничены. В дальнейшем такие этапы именуется критическими этапами прохождения спутником многочисленных теневых участков орбиты.

На теневых участках орбиты в условиях отсутствия энергопритока и ограниченной емкости аккумуляторных батарей системы электроснабжения возможности КА по выполнению целевых задач могут быть снижены (особенно на заключительных этапах эксплуатации, ко-

гда степень деградации накопителей энергии и панелей солнечных батарей является значимой). Учесть указанные особенности существенно неравномерного энергопритока с целью улучшения показателей орбитальной группировки можно не только на этапе проектирования бортовой системы электроснабжения космических аппаратов, но и при обосновании баллистической структуры системы.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для более объективной оценки значимости влияния наличия критических этапов прохождения спутником многочисленных теневых участков орбиты на вариант орбитального построения высокоорбитальной группировки КА целесообразно предварительно исследовать периодичность, продолжительность наступления этих этапов в зависимости от параметров орбиты, времени года. Для этого вначале рассматривается указанная частная задача исследований.

Пусть на момент t_0 объектовая ситуация задана следующим образом:

1) круговая орбита КА – параметрами:

$\sim \Omega_{0\text{КА}}$ – прямым восхождением восходящего узла орбиты КА;

$\sim i_{\text{КА}}$ – наклоном плоскости орбиты КА;

$\sim r_{\text{КА}}$ – радиусом орбиты КА;

$\sim u_{0\text{КА}}$ – аргументом широты расположения спутника в начальный момент времени;

2) орбита видимого (относительного земного наблюдателя) движения Солнца в плоскости эклиптики – величинами:

$\sim \varepsilon$ – наклоном плоскости орбиты Солнца к плоскости экватора Земли;

$\sim L_{\text{Солн}}$ – радиусом орбиты видимого движения Солнца, численно равным среднему радиусу орбиты Земли (астрономической единице), $L_{\text{Солн}} \approx 149.597807 \cdot 10^9$ м;

$\sim U_{0\text{Солн}}$ – аргументом широты проекции Солнца в начальный момент времени на единичную сферу, центр которой совпадает с центром масс Земли;

3) геометрия рассматриваемых небесных тел – радиусами:

$\sim R_3$ – средним радиусом Земли, $R_3 \approx 6.371 \cdot 10^6$ м;

$\sim R_{\text{ЭКВ}}$ – экваториальным радиусом Земли, $R_{\text{ЭКВ}} \approx 6.3781366 \cdot 10^6$ м;

$\sim R_{\text{Солн}}$ – средним радиусом Солнца, $R_{\text{Солн}} \approx 6.96 \cdot 10^8$ м.

В расчетах целесообразно принять следующие допущения:

– видимое движение Солнца в плоскости эклиптики происходит по круговой орбите с уг-

ловой скоростью обращения $\omega_{\text{Солн}} = \frac{2 \times \pi}{T_{\text{год}}}$, причем справедливо соотношение

$$U_{\text{Солн}} = U_{0\text{Солн}} + \omega_{\text{Солн}} \cdot (t - t_0).$$

Здесь $U_{\text{Солн}}$ – аргумент широты проекции Солнца в момент времени t ;

$T_{\text{год}}$ – средняя продолжительность года в сутках (средний период обращения Земли вокруг Солнца), $T_{\text{год}} \approx 365.256$;

– вследствие нецентральности гравитационного поля Земли вековые уходы испытывает прямое восхождение восходящего узла орбиты КА. Поэтому его текущее значение определяется по формулам:

$$\Omega_{\text{КА}} = \Omega_{0\text{КА}} + \dot{\Omega}_{\text{КА}} \cdot (t - t_0),$$

$$\dot{\Omega}_{КА} = \frac{\Delta\Omega_{1\text{век}}}{T_{КА}},$$

$$\Delta\Omega_{1\text{век}} = 3 \cdot \pi \times C_{20} \cdot \left(\frac{R_{ЭКВ}}{r_{КА}} \right)^2 \cdot \cos i_{КА},$$

$$T_{КА} = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{r_{КА}^3}{\mu}} \cdot \left[1 + \frac{3}{4} \cdot C_{20} \cdot \left(\frac{R_{ЭКВ}}{r_{КА}} \right)^2 \cdot (1 + 5 \cdot \cos^2 i_{КА}) \right].$$

Здесь $\mu = 3.9860044 \times 10^{14} \text{ м}^3/\text{с}^2$. В формулах введены следующие обозначения: C_{20} – постоянные гравитационного поля Земли, $C_{20} = -0.00109808$; $T_{КА}$ – драконический период обращения КА по орбите; $\dot{\Omega}_{КА}$ – скорость прецессии линии узлов орбиты; $\Delta\Omega_{1\text{век}}$ – вековой уход прямого восхождения восходящего узла орбиты КА за один виток.

Требуется: определить периодичность и продолжительность критических этапов прохождения спутником многочисленных теневых участков орбиты, а именно на заданном интервале времени $T_{\text{исслед}} = [t_0, t_{\text{зад}}]$ определить количество L и границы чередующихся бестеневых $T_{\text{освещ } l}$ и критических $T_{\text{критич } l}$ этапов прохождения спутником теневых участков орбиты. То есть

$$T_{\text{исслед}} = \bigcup_{l=1}^L (T_{\text{освещ } l} \cup T_{\text{критич } l})$$

(обозначения в формуле: l – номер этапа, L – количество этапов), а также рассчитать продолжительность этих этапов.

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ПЕРИОДИЧНОСТИ И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ КРИТИЧЕСКИХ ЭТАПОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДА НАЛОЖЕНИЯ ОРБИТАЛЬНЫХ КАРТ

В работе [1] исследованы условия, влияющие на интенсивность освещения панелей солнечных батарей КА на разных этапах его полета, указан способ расчета границ бестеневых этапов (для цилиндрической модели теневой области от Земли) на базе итерационного процесса, основанного на анализе углового расстояния на единичной сфере между проекцией Солнца и плоскостью орбиты спутника. Ниже предлагается оригинальный алгоритм решения более общей задачи, основанный на использовании метода наложения орбитальных карт [2, 3]. Данный численно-аналитический метод разработан для оперативного расчета параметров (доступности и разрывности) функции потока событий наблюдения точек поверхности сферической Земли орбитальной группировкой спутников (понятие «функция потока событий наблюдения точек поверхности сферической Земли одним КА» введено в работе [4]). В основе метода наложения орбитальных карт лежит исследование зависимости угловой дальности ρ между подспутниковой точкой и точечным объектом (потребителем) на Земле от времени [2]:

$$\cos \rho = A \cdot \sin u + B \cdot \sin u \cdot \sin L + C \cdot \cos u \cdot \cos L, \quad (1)$$

где

$$A = \sin \varphi_{\Pi} \cdot \sin i_{КА}; \quad B = \cos \varphi_{\Pi} \cdot \cos i_{КА};$$

$$C = \cos \varphi_{\Pi}; \quad u = u_0 + \omega_{КА} \cdot (t - t_0); \quad L = L_0 + \omega_3 \cdot (t - t_0).$$

В формулах введены следующие обозначения:

u – аргумент широты КА, отсчитываемый от экватора до спутника вдоль орбиты;

$\omega_{КА}$ – угловая скорость обращения спутника по орбите, $\omega_{КА} = \frac{2 \times \pi}{T_{КА}}$;

L – угол, отсчитываемый в плоскости экватора от направления на точку весеннего равноденствия до текущего положения меридиана объекта (потребителя), $L_0 = L(t_0)$;

ω_3 – угловая скорость вращения Земли;

$\varphi_{П}$ – географическая широта объекта (потребителя).

Основным этапом метода является построение некоторого овала – замкнутой кривой на координатной плоскости (ось абсцисс – это географическая широта расположения потребителя, ось ординат – момент времени, когда угловое расстояние становится равным заданному значению $r=r_{зад}$). Данный овал получил название орбитальной карты (история появления термина относится к 60-м годам прошлого столетия – годам становления практической космонавтики, когда подобные заранее подготовленные карты использовались для определения интервалов радиовидимости с наземными измерительными пунктами). В некоторых источниках [5] такие овалы названы «следограммами» ввиду их некоторого сходства по внешнему виду со следом ноги.

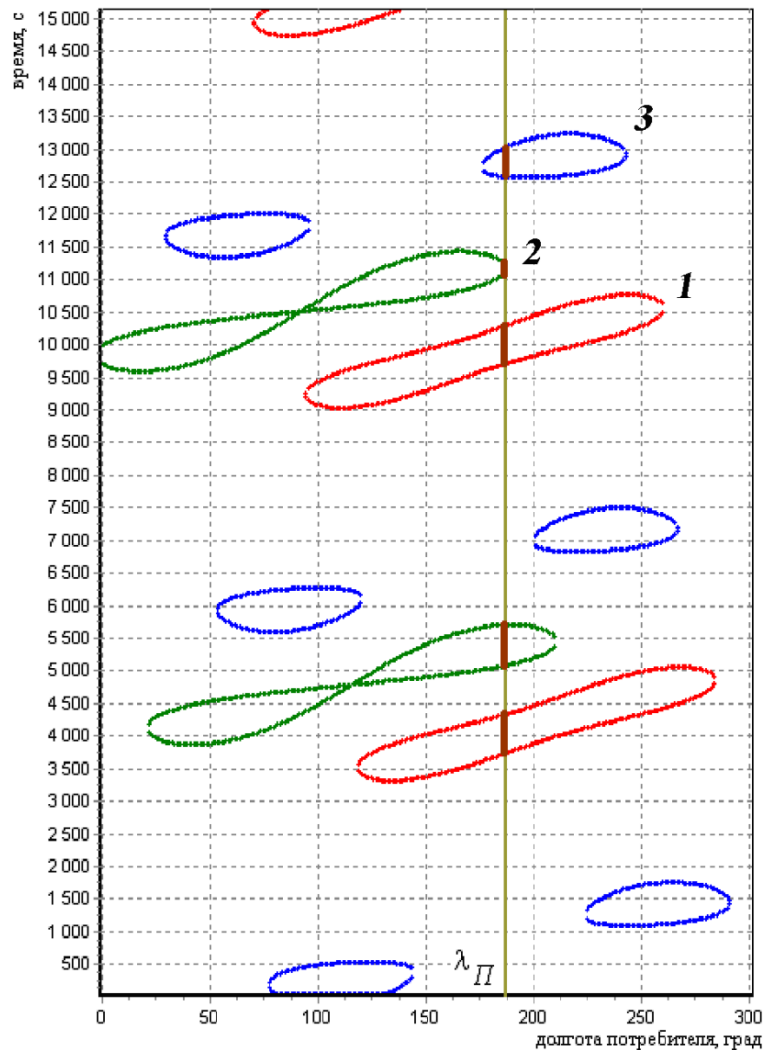


Рис. 1. Совокупность орбитальных карт для системы из трех спутников

Важнейшим элементом орбитальных карт являются координаты правой и левой граничных точек. В работе [3] для расчета абсцисс этих точек получено следующее уравнение 4-й степени относительно переменной $\sin L$:

$$M \cdot \sin^4 L + N \cdot \sin^3 L + P \cdot \sin^2 L + Q \cdot \sin L + R = 0, \quad (2)$$

здесь коэффициенты M , N , P , Q и R вычисляются по формулам:

$$M = (C \cdot F + B \cdot E)^2,$$

$$N = 2 \cdot A \cdot (B + E) \cdot (C \cdot F + B \cdot E),$$

$$P = A^2 \cdot (B + E)^2 + 2 \cdot (B \cdot E + C \cdot F) \cdot (A^2 - C \cdot A) + D^2 \cdot F^2 - D^2 \cdot E^2,$$

$$Q = 2 \cdot A \cdot (A^2 - C \cdot F) \cdot (B + E) - 2 \cdot A \cdot D^2 \cdot E,$$

$$R = (A^2 - C \cdot F)^2 - D^2 \cdot F^2 - A^2 \cdot D^2,$$

где $E = B - \frac{\omega_3}{\omega_{КА}} \cdot C$; $F = \frac{\omega_3}{\omega_{КА}} \cdot B - C$, $D = -\cos \rho_{\text{зад}}$. В качестве заданной величины $\rho_{\text{зад}}$ выступает центральный угол φ_3 круговой зоны обзора спутника.

Второй этап метода состоит в копировании и параллельном переносе построенной орбитальной карты для одного витка на координатной плоскости по следующему правилу: овалы для последующих витков перемещаются параллельным переносом вертикально вверх на величину драконического периода $T_{КА}$ и смещаются вправо или влево вдоль оси абсцисс на величину $\Delta\lambda_{МВ} = \omega_3 \cdot T_{КА}$ межвиткового расстояния между восходящими узлами орбит на смежных витках. Такая операция повторяется для всех КА группировки, причем спутники могут располагаться на разных орбитах и могут оснащаться бортовой аппаратурой наблюдения разных типов. В результате на координатной плоскости изображается совокупность овалов, которые, вообще говоря, могут пересекаться. В этом случае можно говорить о наложении их друг на друга: отсюда происходит название данного метода. На рис. 1 приводится пример совокупности орбитальных карт для орбитальной группировки из трех спутников.

На *заключительном этапе* метода определяются интервалы наблюдения заданного объекта группировкой КА наблюдения. С этой целью для известной географической долготы $\lambda_{П}$ проводится вертикальная линия, а точки ее пересечения с какой-либо орбитальной картой определяют моменты начала и окончания интервала наблюдения потребителя соответствующим спутником. На основе такой информации в дальнейшем определяются показатели доступности и разрывности наблюдения, характеризующие функцию потока событий наблюдения точек поверхности сферической Земли орбитальной группировкой спутников.

Приложение данного метода к решению задачи расчета периодичности и продолжительности критических этапов прохождения спутником многочисленных теневых участков орбиты состоит в следующем. Срединной точкой каждого такого этапа является момент времени, когда Солнце пересекает плоскость орбиты КА, т. е. когда угловое расстояние от конца вектора орта нормали к плоскости орбиты спутника до проекции Солнца на единичную сферу становится равным 90^0 . Это означает, что для поиска решения поставленной задачи необходимо исследовать зависимость между двумя точками, каждая из которых движется по круговой траектории с разными периодами по поверхности единичной сферы, центр которой совпадает с центром Земли. При этом одна из них – проекция Солнца – совершает движение по большому кругу с угловой скоростью $\omega_{\text{Солн}}$, а именно – по эклиптике, а вторая точка – конец

вектора орта нормали к плоскости орбиты спутника – по малому кругу. Последнее движение возникает вследствие прецессии плоскости орбиты из-за нецентральности гравитационного поля Земли с угловой скоростью $\dot{\Omega}_{КА}$. Такое же движение двух точек рассматривалось и при разработке метода наложения орбитальных карт: подспутниковая точка движется по большому кругу (текущей проекции орбиты на сферическую Землю) с угловой скоростью $\omega_{КА}$, а вторая точка (потребитель) – по малому кругу, вращаясь вместе с Землей с угловой скоростью ω_3 . Поэтому применение метода наложения орбитальных карт состоит в том, чтобы сформировать коэффициенты уравнений (1) и (2) в соответствии с исходными данными задачи:

$$A = \sin(90^\circ - i_{КА}) \cdot \sin \varepsilon = \cos i_{КА} \cdot \sin \varepsilon ,$$

$$B = \cos(90^\circ - i_{КА}) \cdot \cos \varepsilon = \sin i_{КА} \cdot \cos \varepsilon ,$$

$$C = \cos(90^\circ - i_{КА}) = \sin i_{КА} ,$$

$$D = -\cos \rho_{зад} = -\cos 90^\circ = 0 , \quad (3)$$

$$E = B - \frac{\dot{\Omega}_{КА}}{\omega_{Солн}} \cdot C ,$$

$$F = \frac{\dot{\Omega}_{КА}}{\omega_{Солн}} \cdot B - C .$$

Нахождение границ критических этапов прохождения спутником многочисленных теневых участков орбиты осуществляется аналогичным образом, но с тем отличием, что в качестве заданного углового расстояния $\rho_{зад}$ выступает другая величина, а именно: для расчета интервалов прохождения полутеневых областей используется соотношение $\rho_{зад} = 90^\circ - \Phi_{полутень}$, теневых областей – $\rho_{зад} = 90^\circ - \Phi_{тень}$. Поэтому коэффициент D в этих случаях должен рассчитываться по формулам:

$$D_{полутень} = -\cos \rho_{зад} = -\cos(90^\circ - \Phi_{полутень}) = -\sin \Phi_{полутень} ,$$

$$D_{тень} = -\cos \rho_{зад} = -\cos(90^\circ - \Phi_{тень}) = -\sin \Phi_{тень} . \quad (4)$$

Процесс образования теневых и полутеневых областей на сфере радиусом $r_{КА}$ (на орбитальной сфере) представлен на рис. 2. Из геометрических построений размеры теневых и полутеневых областей можно найти следующим образом:

$$\Phi_{тень} = \Phi_1 = GC_3 = \arcsin \frac{R_3}{r_{КА}} - \arcsin \frac{R_{Солн} - R_3}{L_{Солн}} ,$$

$$\Phi_{полутень} = \Phi_2 = GF_3 = \arcsin \frac{R_3}{r_{КА}} + \arcsin \frac{R_{Солн} + R_3}{L_{Солн}} . \quad (5)$$

Найденные размеры теневых и полутеневых областей позволяют рассчитать суммарные максимальные длительности $\Delta t_{тень}$, $\Delta t_{полутень}$ прохождения спутником этих областей на каждом из этапов по формулам:

$$\Delta t_{тень} = \frac{2 \cdot \Phi_{тень}}{\omega_{КА}} ,$$

$$\Delta t_{\text{полутень}} = \frac{2 \cdot \Phi_{\text{полутень}}}{\omega_{\text{КА}}} \quad (6)$$

Таким образом, рассмотрены алгоритмы решения поставленной задачи, которые в соответствии с методом наложения орбитальных карт по соотношениям (1)–(6) позволяют определить количество и границы искомых бестеневых и критических этапов прохождения спутником многочисленных теневых (полутеневых) участков орбиты.

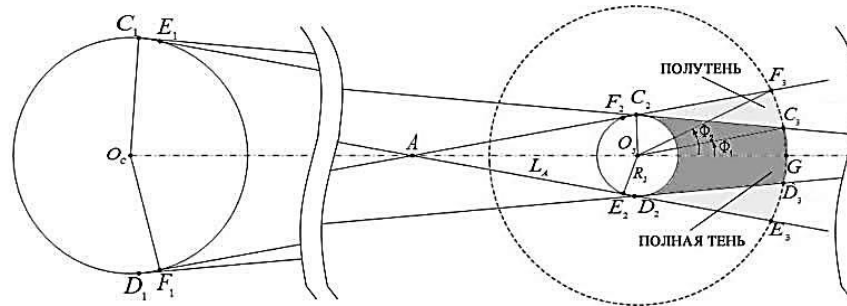


Рис. 2. Образование теневых и полутеневых областей на орбитальной сфере

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРИОДИЧНОСТИ И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ КРИТИЧЕСКИХ ЭТАПОВ ПРОХОЖДЕНИЯ СПУТНИКОМ ТЕНЕВЫХ УЧАСТКОВ ОРБИТЫ

Представленные выражения (4)–(6) позволили построить графические зависимости размеров (в градусах) $\Phi_{\text{тень}}$, $\Phi_{\text{полутень}}$ теневых и полутеневых областей и максимальных длительностей (в минутах) $\Delta t_{\text{тень}}$, $\Delta t_{\text{полутень}}$ их прохождения спутником от радиуса орбиты КА, которые изображены на рис. 3 и 4.



Рис. 3. Зависимость размеров теневых и полутеневых областей от радиуса орбиты КА

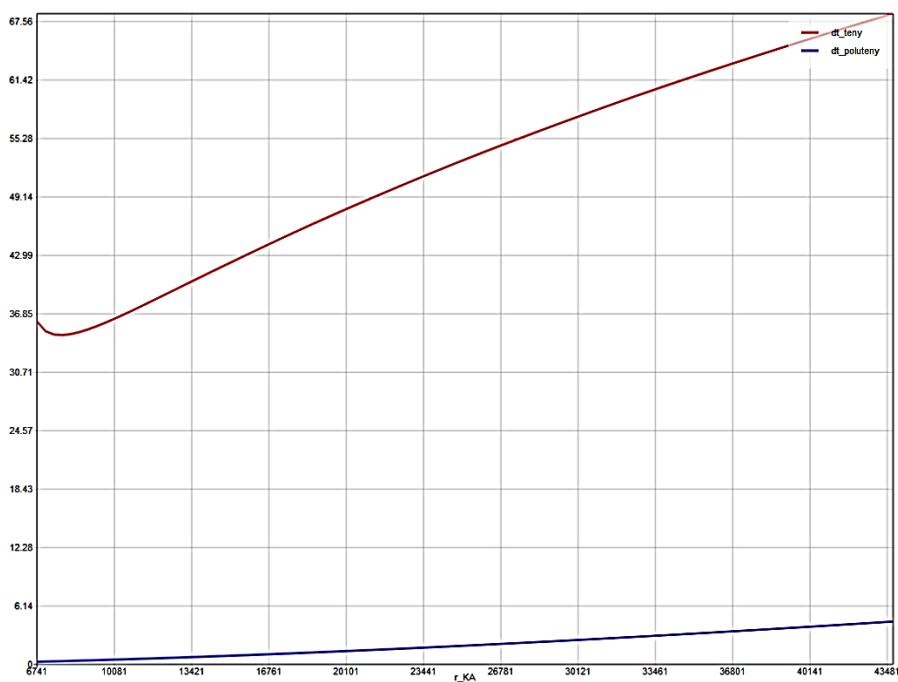


Рис. 4. Зависимость длительностей прохождения КА теневого и полутеневого участков

Из анализа графиков следует, что с увеличением радиуса орбиты размеры теневого зон (углы полураствора – величины $\Phi_{\text{тень}}$, $\Phi_{\text{полутень}}$) уменьшаются от 70 градусов для низких высот орбит до 8 градусов для геосинхронных суточных орбит. Длительности нахождения спутника в этих областях, наоборот, возрастают от 35 мин на низких орбитах и до 70–72 мин – на высоких. Периодичность наступления критических этапов прохождения спутником многочисленных теневого (полутеневого) участков орбиты составляет 5–6 месяцев в зависимости от времени года и от параметров орбиты КА.

ОСОБЕННОСТИ ОБОСНОВАНИЯ ОБЛИКА ПЕРСПЕКТИВНЫХ ВЫСОКООРБИТАЛЬНЫХ ГРУППИРОВОК ПРИ УЧЕТЕ КРИТИЧЕСКИХ ЭТАПОВ ПРОХОЖДЕНИЯ СПУТНИКОМ ТЕНЕВЫХ УЧАСТКОВ ОРБИТЫ

Существенно неравномерный энергоприток на критических этапах полета, длительное прохождение спутником теневого участков негативно сказываются на функционировании бортовой системы электроснабжения КА и приводят к снижению (ограничению) его возможностей по выполнению целевых задач. Для улучшения показателей функционирования КА негативное влияние указанных факторов уменьшают на этапе предъявления требований к бортовым системам КА и выбора параметров системы электроснабжения. Однако представляется возможным и целесообразным компенсировать негативные последствия в части повышения энергообеспеченности отдельного КА и энергоустойчивости орбитальной группировки в целом путем выбора рациональных вариантов облика перспективных космических систем и их баллистических структур. В частности, более предпочтительными вариантами орбитального построения следует считать те, которые предполагают размещение в каждой плоскости орбит минимального количества спутников (лучше всего в плоскости размещать по одному КА), поскольку в этом случае критические этапы будут распределены более равномерно для всей группировки. Такой способ позволит избежать значимого ухудшения це-

левых показателей функционирования космической системы, когда сразу несколько спутников из одной плоскости орбит оказываются в неблагоприятных условиях энергопритока.

При обосновании облика перспективных высокоорбитальных космических систем следует учитывать то обстоятельство, что в настоящее время совершенствуются технологии беспроводной передачи энергии, в том числе в космосе [5–7]. Поэтому для обеспечения бесперебойного выполнения целевых задач на критических этапах прохождения теневых участков в перспективе возможно использование дополнительных источников энергии, расположенных на соседних КА системы из других плоскостей орбит или на спутниках другой группировки со своим баллистическим построением. В этом случае возникает необходимость выбора орбитального построения с использованием полиструктур [8–11]. Вследствие этого возникает следующая задача – синтез спутниковой системы.

Пусть высокоорбитальная многофункциональная группировка имеет в своем составе спутники двух типов: многофункциональные КА землеобзора (связи, навигации) и КА, выполняющие функции навигационных спутников и генерирования электроэнергии с последующей ее передачей на КА первого типа.

Пусть рабочая область бортовой аппаратуры КА обоих типов для выполнения задач навигации, связи, управления описывается круговым конусом с основанием в фокусе соответствующих антенн (в дальнейшем полагается, что фокус совпадает с центром масс спутников). Ось конуса проходит через центр Земли. Пересечением конуса со сферической Землей является сферический круг радиусами $\varphi_{3I}, \varphi_{3II}$ для КА первого и второго типов соответственно.

Пусть задано N_I, N_{II} – количество КА первого и второго типов соответственно; баллистическая полиструктура $S = \{S_I, S_{II}\}$, $S_I = \{N_I, X_I\}$, $S_{II} = \{N_{II}, X_{II}\}$ орбитальной группировки определена в классе однотрассовых орбит с несколькими параметрами. К ним относятся:

i_I, H_I – наклонение плоскостей орбит и высота базирования спутников первого типа;

i_{II}, H_{II} – наклонение плоскостей орбит и высота базирования КА второго типа;

$\Omega_{\text{БАЗ}I}, \Omega_{\text{БАЗ}II}$ – прямое восхождение восходящего узла орбит базовых КА первого и второго типов соответственно на начальный момент t_0 исследования $T_{\text{исслед}} = [t_0, t_k]$ (пусть, для определенности, начало интервала исследования совпадает с моментом нахождения Солнца в точке весеннего равноденствия $t_0 \equiv t_{\text{ТВР}}$).

$\tilde{\Omega}_j$ – приведенное (относительно базового КА группировки) прямое восхождение восходящего узла орбиты, $\tilde{\Omega}_j = \Omega_j - \Omega_{\text{БАЗ}}$, $j_I = 1, \dots, N_I$, $j_{II} = 1, \dots, N_{II}$;

u_{0j} – аргумент широты j -го КА в начальный момент времени t_0 , $j_I = 1, \dots, N_I$, $j_{II} = 1, \dots, N_{II}$.

Пусть $L_{\text{пред}}$ – предельная дальность между двумя разнотипными КА, когда возможна дистанционная передача энергии.

Требуется определить такой вариант орбитального построения с одним спутником в каждой плоскости орбит, чтобы обеспечить:

– заданные условия землеобзора всей группировки;

– требуемую длительность интервала времени, когда расстояние от спутника первого типа, находящегося на теневом участке орбиты, до КА второго типа не превышает предельно допустимой величины $L_{\text{пред}}$.

Современные системы в основном строятся по правилу (способу) кинематически правильных систем и систем-цепочек, когда в начальный момент времени искусственные спутники Земли располагаются в вершинах некоторой симметричной кристаллической решетки [8–10]. Недостатком известного способа является относительно большая потребная ширина полосы обзора бортовой аппаратуры сканирования, которая может быть уменьшена при со-

хранении прочих преимуществ способа лишь специальным расположением спутников на орбитах.

Перспективным направлением синтеза и оптимизации баллистических структур спутниковых систем является теория диссимметричных VG-систем [11–15]. Данный класс орбитального построения существенно расширяет множество альтернатив для синтеза баллистических структур спутниковой системы. В работах [11–15] обоснован рассматриваемый класс и подробно описаны его особенности. Программная реализация разработанных алгоритмов позволила провести масштабные численные исследования и получить достаточно широкий спектр конкретных вариантов диссимметричных баллистических структур орбитальных систем, показатели качества функционирования которых превышают лучшие показатели известных систем на 5–20% и более в зависимости от количественного состава группировки, назначения системы, наклонения плоскостей орбит базирования и других факторов.

При обосновании орбитального построения перспективных космических систем особое место занимают группировки из пяти спутников, поскольку меньшим их количеством обеспечить непрерывное покрытие зонами обзора КА всей поверхности Земли и околоземного пространства невозможно [8–11]. Ниже представлены результаты численных исследований и сравнительного анализа вариантов орбитального построения системы кинематически правильных и диссимметричных систем при различных наклонениях плоскостей орбит базирования спутников. Зависимость значения целевой функции (потребного угла землеобзора φ_3) от наклонения плоскостей орбит i для кинематически правильных систем (кривая с надписью «КПС») и найденных двух семейств VG-систем имеет вид, представленный на рис. 5.

Анализ полученных результатов позволил выявить закономерности орбитального построения диссимметричных систем и обосновать новый способ, суть которого состоит в следующем. Теоретическое обоснование базируется на идеях дифференциального исчисления и математического программирования, заключающихся в последовательном определении таких приращений начального положения одного или нескольких космических аппаратов, чтобы в конечном итоге обеспечить лучшие показатели качества функционирования системы.

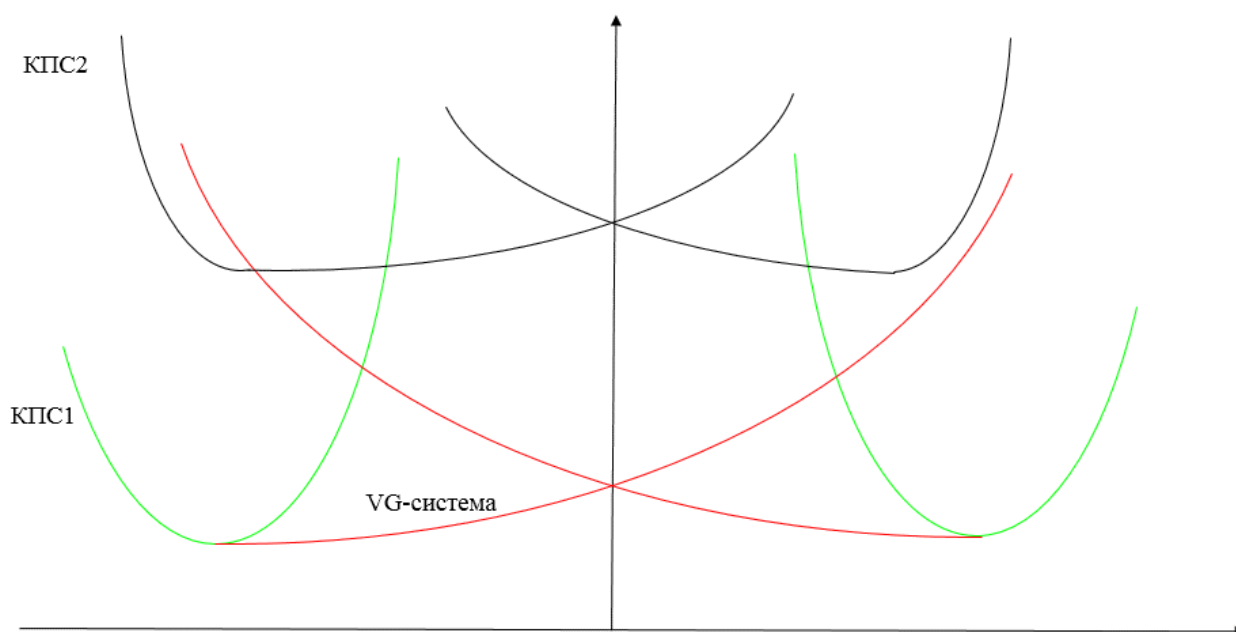


Рис. 5. Зависимость целевой функции землеобзора от наклонения орбит системы для разных классов баллистических структур (кинематически правильных и диссимметричных)

Предложенный способ предполагает не равномерное вдоль экватора Земли расположение восходящих узлов плоскостей орбит, а попарно симметричное. Для выполнения целевой задачи при неравномерном расположении плоскостей орбит расположение искусственных спутников Земли в пределах каждой плоскости орбит также должно быть неравномерным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные алгоритмы и результаты численных исследований позволяют сделать следующие выводы:

– показатели периодичности и продолжительности критических этапов прохождения спутником многочисленных теневых участков орбит свидетельствуют о значимости данного фактора, существенно влияющего на энергообеспеченность отдельного КА и энергоустойчивость орбитальной группировки в целом;

– степень негативного влияния данного фактора может быть ослаблена за счет выбора рациональных вариантов облика перспективных космических систем и их баллистических структур. В частности, более предпочтительными вариантами орбитального построения следует считать те, которые предполагают размещение в каждой плоскости орбит минимального количества спутников (лучше всего в плоскости размещать по одному КА). Суть другого способа состоит в использовании на теневых участках орбиты внешних источников энергии и беспроводных технологий ее передачи в космосе.

Рассмотрена математическая постановка задачи обоснования облика перспективной высокоорбитальной многофункциональной группировки. На основе анализа альтернативных способов орбитального построения систем сделан вывод о предпочтительности использования класса диссимметричных баллистических структур. В частности, для систем непрерывного глобального землеобзора минимального состава из пяти спутников, построенных с использованием плоскостей орбит различных наклонений, реализуемых с космодромов РФ, диссимметричные структуры обеспечивают лучшие целевые показатели на 10–25% по сравнению с известными системами.

Список используемых источников

1. Математическое моделирование динамики температуры солнечных батарей в различных условиях орбитального полета космического аппарата / Н. Н. Астахов [и др.] // Вестник МГТУ имени Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2016. – № 6. – С. 4–19. – DOI: 10.18698/0236-3941-2016-6-4-21.

2. Горбулин В. И., Зозуля Л. П., Чернявский В. А. Применение кватернионов для аналитического расчета интервалов наблюдения спутником заданного объекта // Информация и космос. – 2009. – № 3. – С. 62–67.

3. Использование орбитальных карт для разработки метода расчета показателей качества спутниковых систем при обзоре широтных поясов Земли / В. И. Горбулин [и др.] // Информация и космос. – 2009. – № 4. – С. 66–74.

4. Бырков Б. П., Головатенко-Абрамов В. И. Об оптимальном баллистическом построении систем ИСЗ периодического обзора районов земной поверхности // Исследование Земли из космоса. – М., 1993. – № 6. – С. 76–80.

5. Саульский В. К. Использование «слеодограмм» для расчета периодичности землеобзора // Исследование Земли из космоса. – М., 1994. – № 2. – С. 65–74.

6. Мацак И. С., Заяц О. В., Кудрявцев Е. М. Разработка системы дистанционного энергообеспечения беспилотных летательных аппаратов лазерным излучением // XV Международная телекоммуникационная конференция молодых ученых и студентов «Молодежь и наука»: тез. докл.: в 3 ч. – 2012. – Ч. 2. – С. 76–77.

7. *Мацак И. С., Тугаенко В. Ю., Кудрявцев Е. М.* Беспроводная передача энергии ИК-излучением между космическими аппаратами // XIV Международная телекоммуникационная конференция молодых ученых и студентов «Молодежь и наука»: тез. докл.: в 3 ч. – 2011. – Ч. 2. – С. 91–92.
8. *Баринов К. Н., Бурдаев М. Н., Мамон П. А.* Динамика и принципы построения орбитальных систем КА. – М., 1975. – 270 с.
9. *Можжаев Г. В.* Синтез орбитальных структур спутниковых систем. Теоретико-групповой подход. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.
10. *Власов С. А.* Основы баллистического проектирования систем КА землеобзора. – МО РФ, 1998. – 94 с.
11. *Горбулин В. И.* Оптимизация орбитального построения глобальных космических систем наблюдения. – МО РФ, 2001. – 171 с.
12. *Горбулин В. И.* Новый способ оптимизации орбитального построения глобальных спутниковых систем // Полет. – 2001. – № 12. – С. 20–26.
13. *Поповкин В. А., Горбулин В. И.* Обоснование нового способа орбитального построения спутниковых систем для повышения качества космического информационного обеспечения // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2011. – Вып. 632. – С. 100–103.
14. Способ орбитального построения навигационной спутниковой системы: пат. 2 314 232 РФ, МКИ В64G 01/10, G01C 21/02 / Поповкин В. А. (РФ) [и др.]. – № 2004116947/63; заявл. 27.10.2004; опубл. 10.01.2008, Бюл. № 1. – 12 с.
15. Разработка системы дистанционного энергоснабжения беспилотных летательных аппаратов / В. А. Богушевская [и др.] // Труды МАИ. – 2012. – № 51.

В. И. Ерохин,
доктор физико-математических наук, профессор;
А. П. Кадочников,
кандидат технических наук;
В. В. Какаев,
доктор военных наук, доцент

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОРБИТЫ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ НА МАЛЫХ ИНТЕРВАЛАХ ВРЕМЕНИ

В статье предложен метод определения параметров движения космических объектов на основе объединения координатной информации, независимо полученной несколькими информационными средствами на малых по отношению к периоду обращения космического объекта нерегулярных интервалах времени. Метод позволит, в отличие от известных методов, программно-реализованных в информационных средствах в виде алгоритмов реального времени, более точно определять параметры кеплеровской модели движения в условиях ошибок единичных замеров. Представлены аналитические выкладки и результаты вычислительных экспериментов с модельными данными.

Ключевые слова: кеплеровская модель движения, определение параметров орбиты, наблюдения на малых интервалах времени

ВВЕДЕНИЕ

Определение параметров орбит и прогноз движения космических объектов (КО) являются важными задачами обеспечения безопасности космической деятельности. Непрерывное увеличение количества КО является реальной угрозой дальнейшему освоению космоса и создает предпосылки возникновения трудно прогнозируемых конфликтных ситуаций между участниками космической деятельности [1, 2]. Основным источником координатной информации о КО являются оптические или радиолокационные информационные средства (ИС), автоматически обрабатывающие информацию в режиме реального времени. Точность координатных измерений указанных ИС существенно зависит от их технических характеристик. В то же время от точности координатных измерений, применяемых математических методов обработки и пространственно-временных характеристик траекторий наблюдаемых объектов зависит точность определения параметров их орбит.

В статье рассмотрен широко распространенный (типовой) метод расчета параметров орбиты КО по совокупности координатных измерений, программно-реализованный в большинстве ИС в виде алгоритма реального времени. Кроме того, предложен оригинальный метод, использование которого в условиях ошибок единичных замеров, позволяет повысить точность определения элементов орбиты на малых мерных интервалах.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КЕПЛЕРОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ОРБИТЫ КОСМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА ПО АППРОКСИМИРОВАННОМУ И СГЛАЖЕННОМУ ВЕКТОРУ СОСТОЯНИЯ

Задача вычисления параметров орбиты КО на основе обработки координатной информации, представляющей собой *единичные замеры* (координаты КО в соответствующие моменты времени), полученные ИС в результате первичной обработки радиолокационной или оптической информации, является классической [3–6]. Вследствие процесса совершенствова-

ния вычислительных средств, возможности быстрого доступа к результатам первичных измерений КО, получаемых ИС в различных странах земного шара, математические методы и алгоритмы решения указанных задач интенсивно развиваются. Вместе с тем при реализации практических задач в системах мониторинга космического пространства, автоматически функционирующих в режиме реального времени, чаще всего используется метод определения параметров орбиты КО, основанный на классической кеплеровской модели невозмущенного движения наблюдаемого объекта в поле тяготения Земли и на формулах небесной механики [7, 8]. В качестве входной информации в указанном методе используются координаты $(x, y, z)_t$ и их производные $(\dot{x}, \dot{y}, \dot{z})_t$ наблюдаемого КО в абсолютной геоцентрической экваториальной системе координат (АГЭСК), привязанные к некоторому «опорному» моменту времени t и сформированные на основании цепочки единичных замеров (в местной топоцентрической сферической системе координат конкретного ИС). Замеры получены через одинаковые (малые) интервалы времени и подвергнуты сглаживанию (с помощью полиномов, построенных взвешенным методом наименьших квадратов) и отсеиванию аномальных измерений. Заметим, что интервал времени, покрываемый всей цепочкой единичных замеров, также является малым по сравнению с периодом обращения наблюдаемого КО. Существенное увеличение указанного интервала в рамках рассматриваемого метода невозможно из-за роста ошибок аппроксимации координат и скоростей кеплеровской модели движения КО формальными полиномиальными (или какими-либо другими) зависимостями.

Совокупность величин $(x, y, z, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z})_t$ в контексте динамической модели движения КО часто называют *вектором состояния* [9]. При отсутствии ошибок измерений элементы кеплеровской модели невозмущенного движения определяются по вектору состояния однозначно и абсолютно точно [7, 8]. Другими словами, точный вектор состояния несет в себе необходимую и достаточную (но не избыточную) информацию для определения кеплеровых элементов орбиты. Однако в реальных условиях, если речь не идет о системе, обладающей высокоточными измерительными средствами (например, о системе военного назначения), компоненты вектора состояния контролируемого КО не могут быть определены безошибочно.

В целях анализа влияния ошибок траекторных измерений на точность рассматриваемого метода проведен вычислительный эксперимент, суть которого заключалась в определении кеплеровых элементов орбиты КО по наблюдениям ИС. К истинным координатам КО, находящегося в зоне видимости ИС, измеренным в местной топоцентрической сферической системе координат в заданные моменты времени с помощью генератора псевдослучайных чисел, были добавлены ошибки, распределенные по нормальному закону с нулевым средним и дисперсиями в пределах технических характеристик моделируемых ИС. Таким образом, в качестве входной информации исследуемого метода сформировано 1000 реализаций цепочки единичных замеров КО. Каждая цепочка содержала 10 единичных замеров, выполненных с интервалом, равным четырем секундам. Для каждой цепочки единичных замеров были выполнены: сглаживание с помощью полиномиальных взвешенных МНК-аппроксимаций зависимостей азимута, угла места и дальности КО от времени; отсеивание аномальных замеров; формирование опорного момента времени; пересчет координат и их производных по времени в АГЭСК; формирование соответствующего аппроксимированного и сглаженного вектора состояния, по которому и определялись кеплеровы элементы орбиты. Для моделирования кеплеровского невозмущенного движения КО были взяты параметры, представленные в табл. 1. Период обращения КО составлял 5700 секунд.

Результаты вычислительного эксперимента показаны на рис. 1 и 2 в виде гистограмм частот распределения значений оцениваемых кеплеровых параметров орбиты. Истинные значения оцениваемых параметров отмечены на рис. 1 и 2 вертикальными линиями.

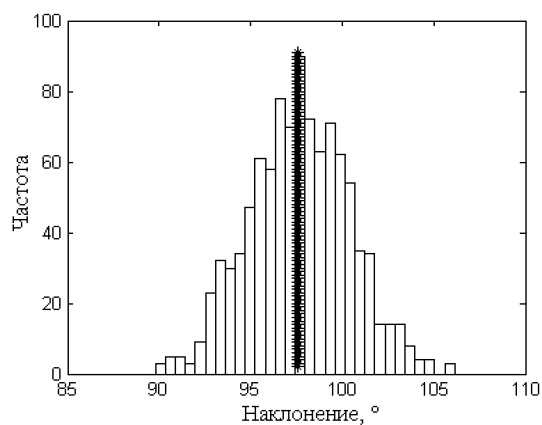
Анализ результатов проведенного вычислительного эксперимента показал, что ошибки в единичных замерах, лежащие в пределах технических характеристик ИС, могут приводить к столь значительным погрешностям в расчете кеплеровых параметров орбиты наблюдаемого

КО, что они могут оказаться недопустимыми для конечного потребителя данной информации.

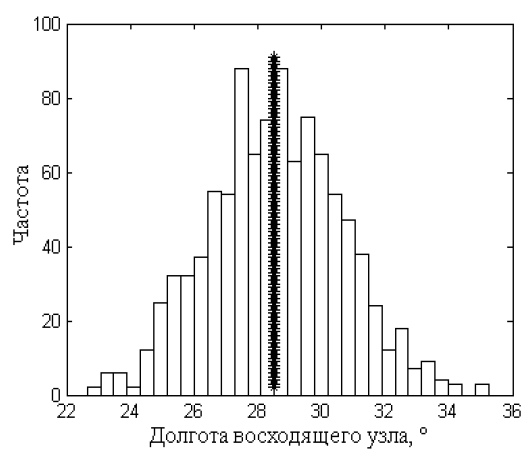
Таблица 1

Параметры кеплеровской орбиты

№ п/п	Название параметра	Численное значение
1	Большая полуось орбиты	$a = 6945000$ м
2	Эксцентриситет орбиты	$e = 0.01$
3	Наклонение орбиты	$i = 97,6^\circ$
4	Долгота восходящего узла	$\Omega = 28,5^\circ$
5	Аргумент перицентра	$\omega = 285^\circ$
6	Время прохождения перицентра	$\tau = 60$ с



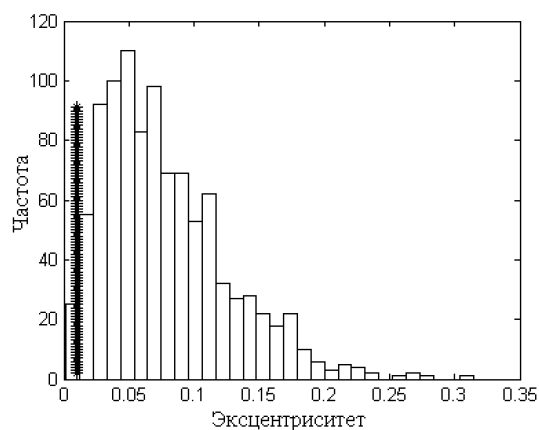
а)



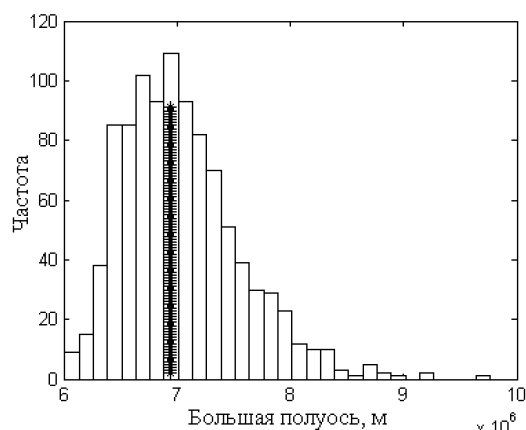
б)

Рис. 1. Гистограммы частот распределения оценки:

а – наклоения; б – долготы восходящего узла



а)



б)

Рис. 2. Гистограммы частот распределения оценки:

а – эксцентриситета; б – большой полуоси

Таким образом, по результатам проведенного исследования можно сделать вывод, что задача разработки метода определения кеплеровых параметров орбиты КО, устойчивого к по-

грешностям исходных данных (ошибками единичных замеров), полученным на малых интервалах времени, является актуальной. Очевидно, что совершенствование указанного метода должно быть реализовано по двум направлениям: путем повышения избыточности привлекаемых экспериментальных координатных данных и путем увеличения временного интервала, содержащего указанные данные.

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОРБИТЫ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ НЕЛИНЕЙНОГО МЕТОДА НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ

Задачу определения кеплеровых параметров орбиты КО рассмотрим как решение переопределенной системы нелинейных уравнений нелинейным методом наименьших квадратов (МНК) с использованием метода Гаусса – Ньютона [10].

В общем виде [10] нелинейная задача о наименьших квадратах имеет вид

$$\text{Найти } \min_{q \in \mathbb{R}^n} \left(\Phi(q) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m (f(q, t_i) - f_i^{\text{эксп}})^2 \right), \quad (1)$$

где q – вектор определяемых параметров,

$$q = [q_1, \dots, q_n]^T;$$

$f(q, t)$ – функция от независимой переменной t и вектора q , причем зависимость от q – нелинейная;

$f_i^{\text{эксп}}$ – экспериментальные значения;

t_i – значения независимой переменной, $i = 1, 2, \dots, m$, $m > n$.

Задача (1) соответствует задаче поиска псевдорешения (решения с минимальной евклидовой нормой невязки) [11] переопределенной и в общем случае несовместной системы нелинейных уравнений вида

$$\begin{aligned} f(q, t_1) &\cong f_1^{\text{эксп}}, \\ &\vdots \\ &\Leftrightarrow F \cong F^{\text{эксп}}, \\ f(q, t_m) &\cong f_m^{\text{эксп}}. \end{aligned} \quad (2)$$

Метод Гаусса – Ньютона поиска псевдорешения системы (2) или, что эквивалентно, поиска минимума функции $\Phi(q)$ представляет собой итерационный процесс, использующий линеаризацию каждого из уравнений системы (2) и МНК-решение полученной линеаризованной системы. Отбросив члены второго порядка малости, систему (2) можно переписать в виде

$$\begin{aligned} f(q, t_1) + \frac{\partial f(q, t_1)}{\partial q_1} \Delta q_1 + \dots + \frac{\partial f(q, t_1)}{\partial q_n} \Delta q_n &\cong f_1^{\text{эксп}}, \\ &\vdots \\ &\Leftrightarrow J \Delta q \cong F^{\text{эксп}} - F = \Delta F, \\ f(q, t_m) + \frac{\partial f(q, t_m)}{\partial q_1} \Delta q_1 + \dots + \frac{\partial f(q, t_m)}{\partial q_n} \Delta q_n &\cong f_m^{\text{эксп}}. \end{aligned} \quad (3)$$

где J – матрица Якоби векторной функции F . С учетом выражения (3) вычислительную схему нелинейного МНК можно представить следующим образом:

1) задать начальное приближение q^0 вектора q ;

2) для $k = 1, 2, \dots$

Положить:

$$\Delta q^k = J^+ \Delta F. \quad (4)$$

Если $\|\Delta q^k\| < \varepsilon$, вычисления закончить. В противном случае – положить:

$$q^k = q^{k-1} + \Delta q^k. \quad (5)$$

В приведенных выше формулах J^+ – матрица, псевдообратная к матрице J [11], ε – допустимая ошибка определения вектора q , символ $\|\cdot\|$ означает евклидову векторную норму.

В задаче определения кеплеровых элементов орбиты по измерениям координат КО формулы (1)–(4) принимают следующий вид.

Найти $q = [a, e, i, \Omega, \omega, \tau]^T$ как решение задачи

$$\Phi(q) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^P \sum_{i=1}^{Q_j} (\Delta x_{i,j}(q))^2 + (\Delta y_{i,j}(q))^2 + (\Delta z_{i,j}(q))^2 \rightarrow \min, \quad (6)$$

где $\{a, e, i, \Omega, \omega, \tau\}$ – кеплеровы элементы орбиты наблюдаемого КО (здесь a – большая полуось, e – эксцентриситет, i – наклонение, Ω – долгота восходящего узла, ω – аргумент перигея, τ – время прохождения перигея). При этом

$$\Delta x_{i,j}(q) = x_{i,j} - x(q, t_{i,j}), \Delta y_{i,j}(q) = y_{i,j} - y(q, t_{i,j}), \Delta z_{i,j}(q) = z_{i,j} - z(q, t_{i,j}). \quad (7)$$

Здесь $x(q, t_{i,j})$, $y(q, t_{i,j})$, $z(q, t_{i,j})$ – расчетные прямоугольные АГЭСК-координаты КО в моменты времени $t_{i,j}$;

$(x, y, z)_{i,j}$ – наблюдаемые прямоугольные АГЭСК-координаты контролируемого КО, полученные ИС с номером j в произвольные (но не совпадающие) моменты времени $t_{i,j}$, $j = 1, \dots, P$, $i = 1, \dots, Q_j$, (где P – количество рассматриваемых ИС; Q_j – количество измерений координат КО, выполненных информационным средством с номером j).

Как видно из представленного выше описания, разрабатываемый метод определения параметров орбиты космических объектов на основе нелинейного метода наименьших квадратов обладает большим потенциалом в использовании *избыточной* информации, в отличие от описанного выше метода определения кеплеровых элементов орбиты космического объекта по аппроксимированному и сглаженному вектору состояния.

Заметим, что интервал времени, покрываемый всем набором обрабатываемых единичных замеров, в принципе может быть достаточно большим по отношению к периоду обращения контролируемого КО. В то же время, как показывают результаты вычислительных экспериментов, рассматриваемый метод оказывается работоспособным на временных интервалах, хотя и больших, чем в методе, описанном выше, но все же меньших чем период обращения контролируемого КО. Это позволяет позиционировать его как метод определения кеплеровых элементов орбиты на малых мерных интервалах.

Согласно кеплеровской модели невозмущенного движения [3] справедливы соотношения:

$$x(q, t_{i,j}) = r_{i,j} \cdot (\cos(u_{i,j}) \cdot \cos(\Omega) - \sin(u_{i,j}) \cdot \sin(\Omega) \cdot \cos(i)), \quad (8)$$

$$y(q, t_{i,j}) = r_{i,j} \cdot (\cos(u_{i,j}) \cdot \sin(\Omega) + \sin(u_{i,j}) \cdot \cos(\Omega) \cdot \cos(i)), \quad (9)$$

$$z(q, t_{i,j}) = r_{i,j} \cdot \sin(u_{i,j}) \cdot \sin(i), \quad (10)$$

где

$$u_{i,j} = \omega + \vartheta_{i,j}, \quad (11)$$

$$r_{i,j} = a \cdot (1 - e \cdot \cos(E_{i,j})), \quad (12)$$

$$\vartheta_{i,j} = 2 \cdot \operatorname{arctg} \left(\sqrt{\frac{1+e}{1-e}} \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{E_{i,j}}{2} \right) \right), \quad (13)$$

$$E_{i,j} \Big| M_{i,j} = E_{i,j} - e \cdot \sin(E_{i,j}), \quad (14)$$

$$M_{i,j} = \sqrt{\frac{\mu}{a^3}} \cdot (t_{i,j} - \tau). \quad (15)$$

В формулах (8)–(15) введены обозначения: $u_{i,j}$ – аргумент широты; $r_{i,j}$ – геоцентрическое расстояние до КО; $\vartheta_{i,j}$ – истинная аномалия; $E_{i,j}$ – эксцентриская аномалия; $M_{i,j}$ – средняя аномалия; μ – гравитационная постоянная Земли, $\mu = 398600.448 \text{ км}^3 \cdot \text{с}^{-2}$.

В соответствии с формулой (14) величина $E_{i,j}$ является решением трансцендентного уравнения Кеплера: $M_{i,j} = E_{i,j} - e \cdot \sin(E_{i,j})$.

Формула (5) применительно к задаче определения кеплеровых параметров орбиты КО принимает вид

$$\begin{aligned} a^k &= a^{k-1} + \Delta a^k, e^k = e^{k-1} + \Delta e^k, i^k = i^{k-1} + \Delta i^k, \\ \Omega^k &= \Omega^{k-1} + \Delta \Omega^k, \omega^k = \omega^{k-1} + \Delta \omega^k, \tau^k = \tau^{k-1} + \Delta \tau^k. \end{aligned} \quad (16)$$

При этом значения поправок Δa^k , Δe^k , Δi^k , $\Delta \Omega^k$, $\Delta \omega^k$, $\Delta \tau^k$ определяются по формуле (4) как МНК-решение переопределенной системы линейных алгебраических уравнений вида (3), где в силу (6) матрица J и вектор ΔF имеют вид:

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial x(q, t_{1,1})}{\partial a} & \frac{\partial x(q, t_{1,1})}{\partial e} & \frac{\partial x(q, t_{1,1})}{\partial i} & \frac{\partial x(q, t_{1,1})}{\partial \Omega} & \frac{\partial x(q, t_{1,1})}{\partial \omega} & \frac{\partial x(q, t_{1,1})}{\partial \tau} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial x(q, t_{Q_p, P})}{\partial a} & \frac{\partial x(q, t_{Q_p, P})}{\partial e} & \frac{\partial x(q, t_{Q_p, P})}{\partial i} & \frac{\partial x(q, t_{Q_p, P})}{\partial \Omega} & \frac{\partial x(q, t_{Q_p, P})}{\partial \omega} & \frac{\partial x(q, t_{Q_p, P})}{\partial \tau} \\ \frac{\partial y(q, t_{1,1})}{\partial a} & \frac{\partial y(q, t_{1,1})}{\partial e} & \frac{\partial y(q, t_{1,1})}{\partial i} & \frac{\partial y(q, t_{1,1})}{\partial \Omega} & \frac{\partial y(q, t_{1,1})}{\partial \omega} & \frac{\partial y(q, t_{1,1})}{\partial \tau} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial y(q, t_{Q_p, P})}{\partial a} & \frac{\partial y(q, t_{Q_p, P})}{\partial e} & \frac{\partial y(q, t_{Q_p, P})}{\partial i} & \frac{\partial y(q, t_{Q_p, P})}{\partial \Omega} & \frac{\partial y(q, t_{Q_p, P})}{\partial \omega} & \frac{\partial y(q, t_{Q_p, P})}{\partial \tau} \\ \frac{\partial z(q, t_{1,1})}{\partial a} & \frac{\partial z(q, t_{1,1})}{\partial e} & \frac{\partial z(q, t_{1,1})}{\partial i} & \frac{\partial z(q, t_{1,1})}{\partial \Omega} & \frac{\partial z(q, t_{1,1})}{\partial \omega} & \frac{\partial z(q, t_{1,1})}{\partial \tau} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial z(q, t_{Q_p, P})}{\partial a} & \frac{\partial z(q, t_{Q_p, P})}{\partial e} & \frac{\partial z(q, t_{Q_p, P})}{\partial i} & \frac{\partial z(q, t_{Q_p, P})}{\partial \Omega} & \frac{\partial z(q, t_{Q_p, P})}{\partial \omega} & \frac{\partial z(q, t_{Q_p, P})}{\partial \tau} \end{pmatrix}, \quad (17)$$

$$\Delta F = \left(\Delta x_{i,j}(q, t_{1,1}) \cdots \Delta x_{i,j}(q, t_{Q_p, P}) \Delta y_{i,j}(q, t_{Q_p, P}) \cdots \Delta y_{i,j}(q, t_{Q_p, P}) \Delta z_{i,j}(q, t_{1,1}) \cdots \Delta z_{i,j}(q, t_{Q_p, P}) \right)^T. \quad (18)$$

Элементы матрицы J могут быть вычислены с использованием аналитических зависимостей, получаемых из формул (8)–(15) с применением правил дифференцирования сложных (а

для эксцентрической аномалии – неявных) функций. Сводка соответствующих формул приведена ниже:

$$\frac{\partial E_{i,j}}{\partial a} = -\frac{3\sqrt{\mu} \cdot (t_{i,j} - \tau)}{2a^{\frac{5}{2}} \cdot (1 - e \cdot \cos(E_{i,j}))}, \quad (19)$$

$$\frac{\partial E_{i,j}}{\partial e} = \frac{\sin(E_{i,j})}{1 - e \cdot \cos(E_{i,j})}, \quad (20)$$

$$\frac{\partial E_{i,j}}{\partial \tau} = -\frac{\sqrt{\mu}}{a^{\frac{3}{2}} \cdot (1 - e \cdot \cos(E_{i,j}))}, \quad (21)$$

$$\frac{\partial r_{i,j}}{\partial a} = 1 - e \cdot \cos(E_{i,j}) + a \cdot e \cdot \sin(E_{i,j}) \cdot \frac{\partial E_{i,j}}{\partial a}, \quad (22)$$

$$\frac{\partial r_{i,j}}{\partial e} = -a \cdot \left(\cos(E_{i,j}) - e \cdot \sin(E_{i,j}) \cdot \frac{\partial E_{i,j}}{\partial e} \right), \quad (23)$$

$$\frac{\partial r_{i,j}}{\partial \tau} = a \cdot e \cdot \sin(E_{i,j}) \cdot \frac{\partial E_{i,j}}{\partial \tau}, \quad (24)$$

$$\chi = \sqrt{\frac{1+e}{1-e}}, \nu_{i,j} = \operatorname{tg}\left(\frac{E_{i,j}}{2}\right), \zeta_{i,j} = \frac{1}{\nu_{j,k}^2 \cdot (e+1) - e+1}, \sigma_{i,j} = \chi \cdot (1-e) \cdot (\nu_{i,j}^2 + 1), \quad (25)$$

$$\frac{\partial u_{i,j}}{\partial a} = \zeta_{i,j} \cdot \sigma_{i,j} \cdot \frac{\partial E_{i,j}}{\partial a}, \frac{\partial u_{i,j}}{\partial e} = \zeta_{i,j} \cdot \left(\sigma_{i,j} \cdot \frac{\partial E_{i,j}}{\partial e} + \frac{2 \cdot \nu_{i,j}}{\chi \cdot (1-e)} \right), \quad (26)$$

$$\frac{\partial u_{i,j}}{\partial \tau} = \zeta_{i,j} \cdot \sigma_{i,j} \cdot \frac{\partial E_{i,j}}{\partial \tau}, \frac{\partial u_{i,j}}{\partial \omega} = 1, \quad (27)$$

$$\begin{pmatrix} (c_x)_{i,j} \\ (c_y)_{i,j} \\ (c_z)_{i,j} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin(u_{i,j}) \cdot \cos(\Omega) + \cos(u_{i,j}) \cdot \sin(\Omega) \cdot \cos(i) \\ -\sin(u_{i,j}) \cdot \sin(\Omega) + \cos(u_{i,j}) \cdot \cos(\Omega) \cdot \cos(i) \\ \cos(u_{i,j}) \cdot \sin(i) \end{pmatrix}, \quad (28)$$

$$\begin{pmatrix} (c_x^\Omega)_{i,j} \\ (c_y^\Omega)_{i,j} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(u_{i,j}) \cdot \sin(\Omega) + \sin(u_{i,j}) \cdot \cos(\Omega) \cdot \cos(i) \\ \cos(u_{i,j}) \cdot \cos(\Omega) - \sin(u_{i,j}) \cdot \sin(\Omega) \cdot \cos(i) \end{pmatrix}, \quad (29)$$

$$\begin{pmatrix} (c_x^i)_{i,j} \\ (c_y^i)_{i,j} \\ (c_z^i)_{i,j} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin(u_{i,j}) \cdot \sin(\Omega) \cdot \sin(i) \\ \sin(u_{i,j}) \cdot \cos(\Omega) \cdot \sin(i) \\ \sin(u_{i,j}) \cdot \cos(i) \end{pmatrix}, \quad (30)$$

$$\frac{\partial x(q, t_{i,j})}{\partial a} = x(q, t_{i,j}) \cdot \frac{\partial r_{i,j}}{\partial a} - r_{i,j} \cdot (c_x)_{i,j} \cdot \frac{\partial u_{i,j}}{\partial a}, \quad (31)$$

$$\frac{\partial y(q, t_{i,j})}{\partial a} = y(q, t_{i,j}) \cdot \frac{\partial r_{i,j}}{\partial a} - r_{i,j} \cdot (c_y)_{i,j} \cdot \frac{\partial u_{i,j}}{\partial a}, \quad (32)$$

$$\frac{\partial z(q, t_{i,j})}{\partial a} = z(q, t_{i,j}) \cdot \frac{\partial r_{i,j}}{\partial a} - r_{i,j} \cdot (c_z)_{i,j} \cdot \frac{\partial u_{i,j}}{\partial a}, \quad (33)$$

$$\frac{\partial x(q, t_{i,j})}{\partial e} = x(q, t_{i,j}) \cdot \frac{\partial r_{i,j}}{\partial e} - r_{i,j} \cdot (c_x)_{i,j} \cdot \frac{\partial u_{i,j}}{\partial e}, \quad (34)$$

$$\frac{\partial y(q, t_{i,j})}{\partial e} = y(q, t_{i,j}) \cdot \frac{\partial r_{i,j}}{\partial e} - r_{i,j} \cdot (c_y)_{i,j} \cdot \frac{\partial u_{i,j}}{\partial e}, \quad (35)$$

$$\frac{\partial z(q, t_{i,j})}{\partial e} = z(q, t_{i,j}) \cdot \frac{\partial r_{i,j}}{\partial e} - r_{i,j} \cdot (c_z)_{i,j} \cdot \frac{\partial u_{i,j}}{\partial e}, \quad (36)$$

$$\frac{\partial x(q, t_{i,j})}{\partial \tau} = x(q, t_{i,j}) \cdot \frac{\partial r_{i,j}}{\partial \tau} - r_{i,j} \cdot (c_x)_{i,j} \cdot \frac{\partial u_{i,j}}{\partial \tau}, \quad (37)$$

$$\frac{\partial y(q, t_{i,j})}{\partial \tau} = y(q, t_{i,j}) \cdot \frac{\partial r_{i,j}}{\partial \tau} - r_{i,j} \cdot (c_y)_{i,j} \cdot \frac{\partial u_{i,j}}{\partial \tau}, \quad (38)$$

$$\frac{\partial z(q, t_{i,j})}{\partial \tau} = z(q, t_{i,j}) \cdot \frac{\partial r_{i,j}}{\partial \tau} - r_{i,j} \cdot (c_z)_{i,j} \cdot \frac{\partial u_{i,j}}{\partial \tau}, \quad (39)$$

$$\frac{\partial x(q, t_{i,j})}{\partial \omega} = -r_{i,j} \cdot (c_x)_{i,j}, \quad (40)$$

$$\frac{\partial y(q, t_{i,j})}{\partial \omega} = -r_{i,j} \cdot (c_y)_{i,j}, \quad (41)$$

$$\frac{\partial z(q, t_{i,j})}{\partial \omega} = -r_{i,j} \cdot (c_z)_{i,j}, \quad (42)$$

$$\frac{\partial x(q, t_{i,j})}{\partial \Omega} = -r_{i,j} \cdot (c_x^\Omega)_{i,j}, \quad \frac{\partial y(q, t_{i,j})}{\partial \Omega} = -r_{i,j} \cdot (c_y^\Omega)_{i,j}, \quad \frac{\partial z(q, t_{i,j})}{\partial \Omega} = 0, \quad (43)$$

$$\frac{\partial x(q, t_{i,j})}{\partial i} = -r_{i,j} \cdot (c_x^i)_{i,j}, \quad \frac{\partial y(q, t_{i,j})}{\partial i} = -r_{i,j} \cdot (c_y^i)_{i,j}, \quad \frac{\partial z(q, t_{i,j})}{\partial i} = -r_{i,j} \cdot (c_z^i)_{i,j}. \quad (44)$$

Для проверки эффективности описанного выше метода, опирающегося на формулы (8)–(44), проведен вычислительный эксперимент. В целях сопоставимости результатов вычислительных экспериментов исходные данные, форма представления результатов и начальные приближения к значениям кеплеровых элементов орбиты были выбраны с помощью описанного выше метода определения кеплеровых элементов орбиты КО по аппроксимированному и сглаженному вектору состояния.

Результаты вычислительного эксперимента приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты вычислительного эксперимента

№ п/п	Истинные значения параметров орбиты	Математическое ожидание параметров орбиты	Среднеквадратическое отклонение параметров орбиты	Абсолютная погрешность определения параметров орбиты
1	$a = 6945000$ м	6944667 м	11874 м	333 м
2	$e = 0.01$	0.009	0.0026	0,001
3	$i = 97,6^\circ$	$97,5980^\circ$	$0,0704^\circ$	$0,0020^\circ$
4	$\Omega = 28,5^\circ$	$28,4985^\circ$	$0,0545^\circ$	$0,0015^\circ$

Получены гистограммы частот распределения оцениваемых кеплеровых параметров орбиты, соответствующие им математические ожидания, среднеквадратические отклонения и абсолютные ошибки. Истинные значения оцениваемого параметра орбиты КО представлены на рис. 3, 4 вертикальной линией.

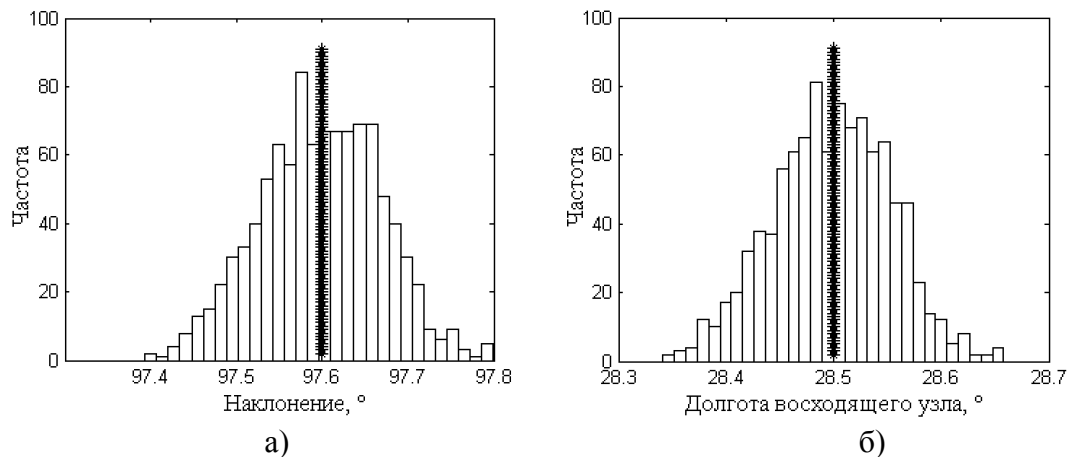


Рис. 3. Гистограммы частот распределения оценки:
а – наклоения; б – долготы восходящего узла

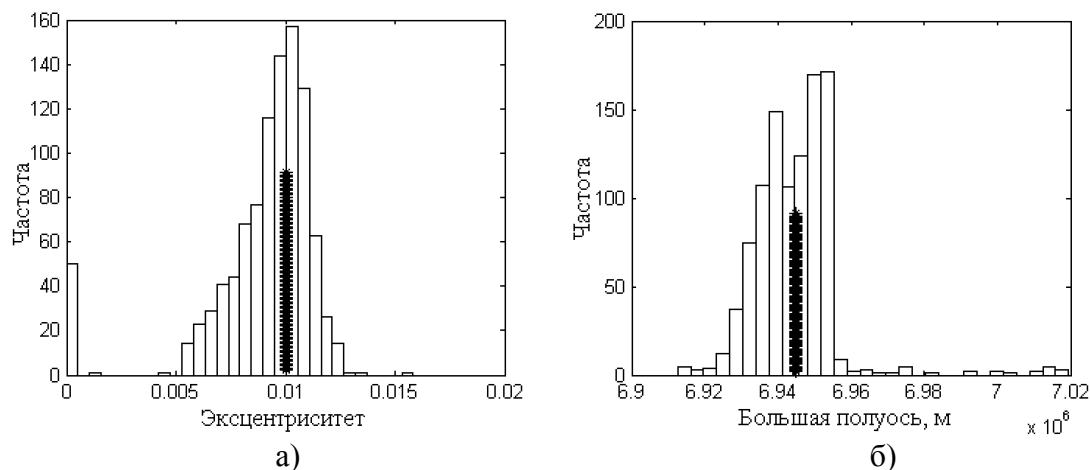


Рис. 4. Гистограммы частот распределения оценки:
а – эксцентриситета; б – большой полуоси

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что влияние случайных ошибок измерений на точность определения параметров орбиты наблюдаемого КО может быть в значительной степени нивелировано за счет применения разработанного метода. Существенно меньшие абсолютные погрешности определения параметров орбиты КО свидетельствуют о том, что метод позволяет вычислить практически несмещенные оценки параметров. Необходимо отметить, что для эффективного применения предложенного метода используется большее количество замеров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предложен усовершенствованный метод определения кеплеровых параметров орбиты КО на основе использования нелинейного метода наименьших квадратов.

Преимуществом разработанного метода, по сравнению с методом определения кеплеровых параметров орбиты КО по аппроксимированному и сглаженному вектору состояния, является более высокая точность КО при работе на малых мерных интервалах и наличии ошибок первичных измерений. Такая более высокая точность достигается благодаря применению более совершенного математического аппарата, позволяющего более полно использовать имеющуюся координатную информацию.

В качестве направления дальнейших исследований можно указать получение оценки эффективности предложенного метода в зависимости от количества привлекаемых ИС, точности их измерений и количества полученных единичных замеров по каждому КО, а также определение предела уровня погрешностей первичных измерений, при превышении которого метод перестает быть эффективным.

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 Российской Федерации от 19 апреля 2013 г. № Пр-906). – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_145908/ (дата обращения: 12.05.2022).
2. АСПОС на страже Земли / Ю. Н. Макаров [и др.] // Воздушно-космическая сфера. – 2016. – № 1(86). – С. 18–25.
3. *Эльясберг П. Е.* Введение в теорию полета искусственных спутников Земли. – М.: Наука, 1965. – 540 с.
4. *Агаджанов П. А., Дулевич В. Е., Коростылев В. А.* Космические траекторные измерения. – М.: Сов. радио, 1969. – 498 с.
5. *Саврасов Ю. С.* Методы определения орбит космических объектов. – М.: Машиностроение, 1981. – 174 с.
6. *Ломако Г. И.* Экспериментальная баллистика космических аппаратов. – СПб.: ВИККА им. А. Ф. Можайского, 1997. – 454 с.
7. *Власов С. А., Кульвиц А. В., Скрипников А. Н.* Теория полета космических аппаратов. – СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2018. – 412 с.
8. *Дубошин Г. Н.* Небесная механика. Основные задачи. – М.: Наука, 1975. – 800 с.
9. Машиностроение: энциклопедия: в 40 т. – М.: Машиностроение, 2012. – Т. IV-22 : Ракетно-космическая техника: в 2 кн., кн. 1 / А. П. Аджян [и др.]; отв. ред. В. П. Легостаев; ред. Э. Л. Аким [и др.]. – 2012. – 924 с.
10. *Дэннис Дж., Шнабель Р.* Численные методы безусловной оптимизации и решения нелинейных уравнений: пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 440 с.
11. *Лоусон Ч., Хенсон Р.* Численное решение задач метода наименьших квадратов: пер. с англ. – М.: Наука, 1986. – 232 с.

Е. Л. Коваленко;

И. А. Фадин,

кандидат технических наук

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ МЕТОД КОСМИЧЕСКОЙ ТРИАНГУЛЯЦИИ

Для предупреждения опасных ситуаций в околоземном космическом пространстве используется автоматизированная система предупреждения об опасных ситуациях – АСПОС. В настоящее время отечественная АСПОС включает только средства наземного базирования, расположенные на территории России и стран ближнего зарубежья, что не позволяет оперативно выявлять изменения в космической обстановке. Для повышения качества решения задачи определения параметров движения космических объектов, предлагается создание орбитального сегмента системы мониторинга космического пространства. Рассмотрен метод определения параметров движения КО, позволяющий определять параметры движения космических объектов сотрудничающими КА, движущимися в разных орбитальных плоскостях при произвольной ориентации осей бортовой оптико-электронной аппаратуры.

Ключевые слова: мониторинг космического пространства, орбитальный сегмент, метод космической триангуляции.

ВВЕДЕНИЕ

Активное использование космического пространства с момента начала космической эры привело к тому, что по состоянию на 01 апреля 2020 г. на околоземных орбитах находилось 20437 космических объектов (КО) [1]. Наличие столь большого количества объектов обуславливает потребность в обладании достоверной информацией об обстановке в космическом пространстве в интересах обеспечения безопасности отечественной орбитальной группировки. Наиболее высокая плотность космического мусора наблюдается в области низких околоземных орбит. Так, 10 февраля 2009 г. произошло столкновение космических аппаратов (КА) «Iridium-33» и «Космос-2251», в результате которого образовалось около полутора тысяч крупных обломков [2]. Данные обломки представляют серьезную опасность для российских КА, поэтому меры по защите отечественной группировки должны приниматься в кратчайшие сроки после возникновения опасной ситуации.

В настоящее время наиболее действенной мерой по защите КА от столкновений с космическим мусором является выбор соответствующих параметров орбит КА, а для этого необходимо обладать информацией о параметрах орбит фрагментов космического мусора.

Задача заблаговременного предупреждения об опасных ситуациях в околоземном пространстве возложена на автоматизированную систему предупреждения об опасных ситуациях (АСПОС). Из-за территориальных ограничений на расположение наземных средств указанной системы она не способна обеспечить глобальность мониторинга космического пространства в области низких околоземных орбит.

В сложившейся обстановке обеспечение глобальности мониторинга космического пространства может быть достигнуто в результате создания орбитального сегмента системы мониторинга космического пространства (ОС СМКП). Построение ОС СМКП, в связи с ограниченностью энергетических ресурсов КА-измерителей (КАИ), целесообразно осуществлять с использованием КА оптико-электронного наблюдения [3, 4].

В настоящее время из существующих методов определения параметров движения КО по результатам измерений наибольшее распространение получили метод Гаусса с учетом различных модификаций [5–12] и метод космической триангуляции [3, 5, 6].

В тоже время, одно из существенных ограничений метода Гаусса состоит в невозможности его использования на коротких мерных интервалах, что является критичным в условиях наблюдения объектов с борта КАИ [3], когда объект находится в зоне обзора КАИ достаточно ограниченное время. Метод космической триангуляции лишен данного недостатка, но реализация данного метода накладывает достаточно жесткие ограничения на взаимное расположение КАИ, а именно наличие взаимной перпендикулярности осей бортовой оптико-электронной аппаратуры (БОЭА) КАИ.

В данной работе предлагается подход, направленный на модификацию метода космической триангуляции как раз с целью устранения указанного ограничения.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Определение параметров движения КО осуществляется при попадании КО в зону двойного обзора БОЭА сотрудничающих между собой КАИ, при этом КО фиксируется на коротком мерном интервале на двух матрицах БОЭА этих КА на фоне звездного неба. В результате синхронных угломерных измерений движения КО с двух КАИ определяются 4 угла ($\alpha_1, \lambda_1, \alpha_2, \lambda_2$) направлений векторов $\vec{D}_1(t_i)$ и $\vec{D}_2(t_i)$ с КАИ₁ и КАИ₂ на КО в момент t_i (рис. 1). С учетом известных значений координат КАИ и длины измерительной базы $B_{1,2}(t_i)$ между

КАИ₁ и КАИ₂ определяется радиус-вектор КО $\vec{r}_Q(t_i) = \begin{pmatrix} X_Q^{ECI} \\ Y_Q^{ECI} \\ Z_Q^{ECI} \end{pmatrix}$.

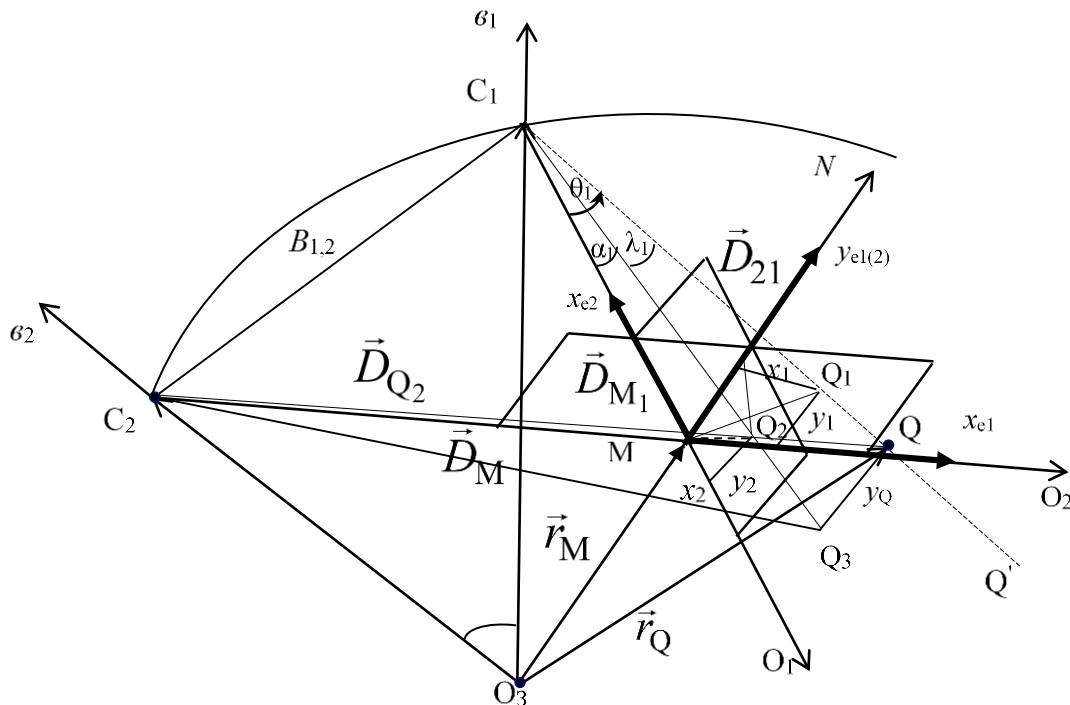


Рис. 1. Схема измерений положения КО с двух КА при использовании метода космической триангуляции:
 x_1, y_1, x_2, y_2 – координаты КО в картинных плоскостях различных КАИ (первого и второго)

Схема производства измерений предусматривает, что сотрудничающие КАИ (C_1 и C_2) движутся в одной орбитальной плоскости, а их оптические оси пересекаются под прямым углом [3]. В этом случае оси приборных систем координат x_{e1}, y_{e1} и x_{e2}, y_{e2} создают ортогональную систему координат $x_{e1}, x_{e2}, y_{e1(2)}$ с началом в точке M (рис. 1). Космический объект (точка Q), одновременно наблюдаемый в полях зрения телескопов, расположенных на разных космических аппаратах, отображается в момент измерения t_i двумя точками Q_1 и Q_2 на матричных фотоприемных устройствах КАИ₁ и КАИ₂. Координаты точек Q_1 и Q_2 в картинных плоскостях КАИ₁ и КАИ₂ позволяют рассчитать координаты точки Q .

Вместе с тем, указанная схема измерений существенно ограничивает область пространства, в пределах которой могут определяться параметры движения КО, в этом случае точка пересечения оптических осей БОЭА (точка M на рис. 1) может располагаться только на поверхности сферы с центром в середине C_1C_2 и радиусом, равным $0,5B_{1,2}$. Таким образом, возникает задача определения параметров движения КО сотрудничающими КАИ, движущимися в разных орбитальных плоскостях при произвольной ориентации осей БОЭА.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ КО СОТРУДНИЧАЮЩИМИ КАИ, ДВИЖУЩИМИСЯ В РАЗНЫХ ОРБИТАЛЬНЫХ ПЛОСКОСТЯХ ПРИ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ОРИЕНТАЦИИ ОСЕЙ БОЭА

При известных положении и ориентации оптических осей БОЭА каждого КАИ \vec{l}_k и \vec{l}_m определяются во второй экваториальной системе координат:

$$\vec{l}_k = (\cos \alpha_k \cos \delta_k, \sin \alpha_k \cos \delta_k, \sin \delta_k), \quad \vec{l}_m = (\cos \alpha_m \cos \delta_m, \sin \alpha_m \cos \delta_m, \sin \delta_m),$$

где $\alpha_{k,m}$ – прямое восхождение КО;
 $\delta_{k,m}$ – склонение КО (рис. 2) [3].

Угол между базисом (C_1C_2) и ортом \vec{l}_k

$$\xi_k^1 = \arccos \left(\frac{X_k X_B + Y_k Y_B + Z_k Z_B}{B_{1,2}} \right), \quad (1)$$

где $X_B = X_{SC_2} - X_{SC_1}$, $Y_B = Y_{SC_2} - Y_{SC_1}$, $Z_B = Z_{SC_2} - Z_{SC_1}$.

Аналогично, угол между базисом и ортом \vec{l}_m

$$\xi_m^2 = \arccos \left(\frac{-X_m X_B - Y_m Y_B - Z_m Z_B}{B_{1,2}} \right). \quad (2)$$

Угол между ортами \vec{l}_k и \vec{l}_m :

$$\Delta_{k,m} = \arccos(-X_k X_m - Y_k Y_m - Z_k Z_m). \quad (3)$$

Для каждого сочетания углов ξ_k^1 , ξ_m^2 , $\Delta_{k,m}$ проверяется условие:

$$|\xi_k^1 + \xi_m^2 + \Delta_{k,m} - \pi| \leq \varepsilon, \quad (4)$$

где ε – малая величина ($\sim 5 \cdot 10^{-6}$ рад) [3], соответствующая точности определения углов направления на объект БОЭА.

По теореме синусов для $\Delta C_1 C_2 Q$:

$$\frac{D_1}{\sin \xi_m^2} = \frac{B_{1,2}}{\sin \Delta_{k,m}},$$

откуда

$$D_1 = \frac{B_{1,2} \sin \xi_m^2}{\sin \Delta_{k,m}}, \quad (5)$$

где $D_1 = C_1 Q$ (рис. 2).

Так как координаты орта \vec{l}_k определены во второй орбитальной системе координат, то координаты КО в абсолютной геоцентрической экваториальной системе координат (ECI):

$$\left. \begin{aligned} X_Q^{\text{ECI}} &= X_{SC_1}^{\text{ECI}} + D_1 \cos \alpha_k \cos \delta_k; \\ Y_Q^{\text{ECI}} &= Y_{SC_1}^{\text{ECI}} + D_1 \sin \alpha_k \cos \delta_k; \\ Z_Q^{\text{ECI}} &= Z_{SC_1}^{\text{ECI}} + D_1 \sin \delta_k. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

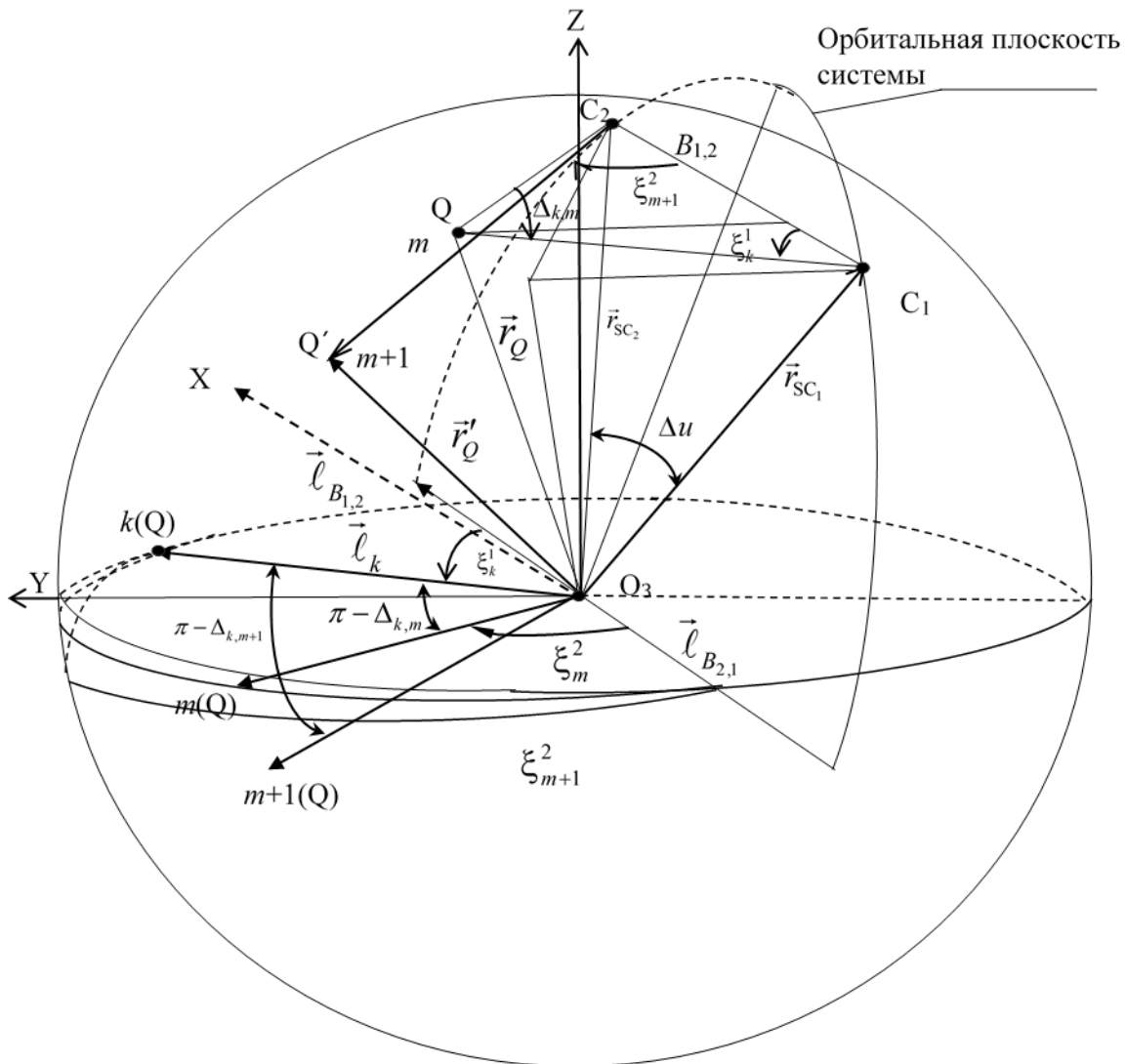


Рис. 2. Определение принадлежности КО зоне двойного обзора (точки k и t принадлежат одному объекту, k и $t + 1$ – нет)

Результаты анализа выражений (1)–(6) показывают отсутствие необходимости обеспечения взаимной перпендикулярности осей БОЭА КАИ, образующих зону двойного обзора, а также отсутствие требования по движению двух КАИ в одной орбитальной плоскости. Таким образом создается возможность существенного расширения границ области пространства, в пределах которой возможно определение параметров движения КО, при условии размещения на КАИ дополнительной БОЭА. Это обусловлено тем, что зоны двойного обзора формируются также и между КАИ, движущимися в разных орбитальных плоскостях. В этом случае объекты обнаруживаются не только в зоне 1, представленной на рис. 3, но также в зонах 2 и 3, что в случае установки на КАИ дополнительных оптических приборов позволит существенно увеличить область, в пределах которой возможно решение задачи определения параметров движения КО.

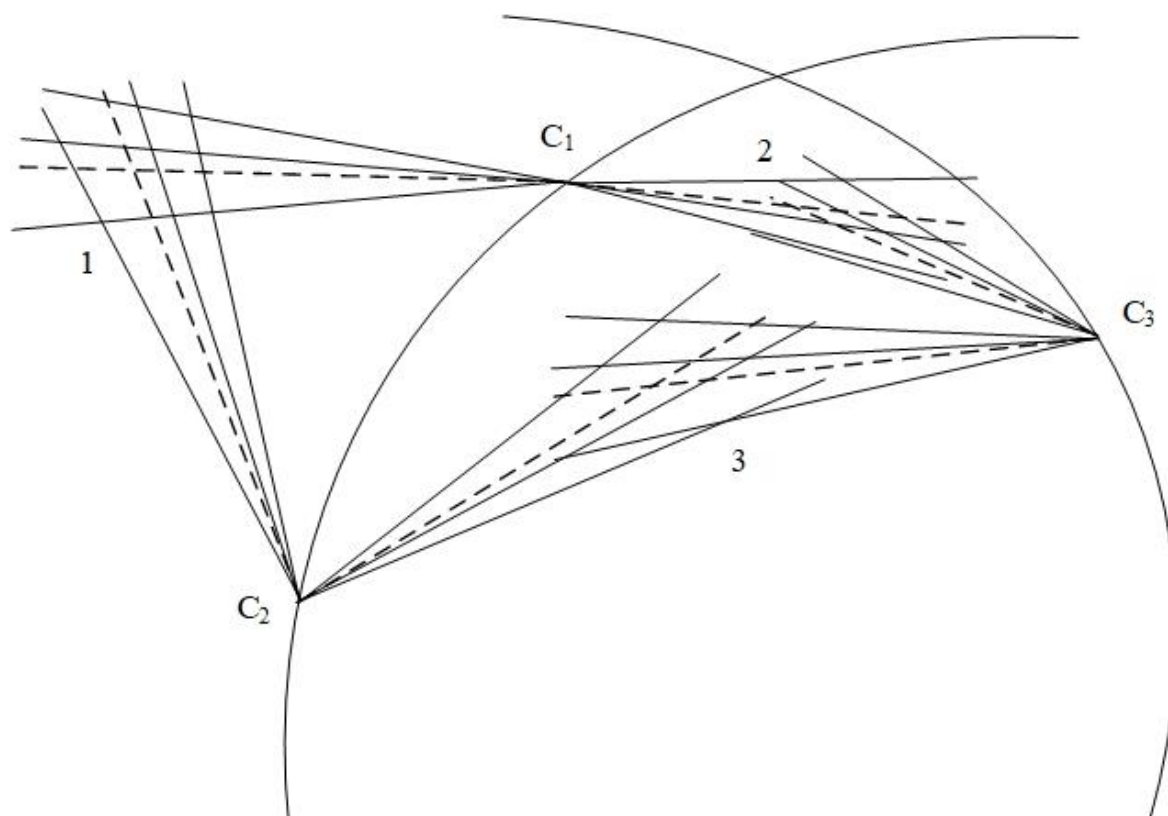


Рис. 3. Зоны двойного обзора, формируемые при использовании метода космической триангуляции (1) и его модификации (1–3)

В качестве примера использована совокупность КО, которые расположены в трех орбитальных плоскостях, равномерно разнесенных по прямому восхождению восходящего узла. В каждой орбитальной плоскости расположено по четыре КО, равномерно распределенных по аргументу широты. Кроме того, начальные значения аргументов широты КО, движущихся в разных орбитальных плоскостях, отличаются на 30° с целью относительно равномерного их распределения в пространстве. Исходные данные по баллистической структуре ОС СМКП представлены в табл. 1.

В результате моделирования получено, что доступная область пространства для определения параметров движения КО при применении модифицированного метода увеличивается на величину, соответствующую траектории движения КО за промежуток времени равный 0,53 периода обращения.

Таблица 1

Параметры ОС СМКП в первом вычислительном эксперименте

Параметр	Значение
Минимально допустимое значение угла между направлениями КАИ – КО и КАИ – Солнце, при котором не наступает засветка БОЭА, °	3
Минимально допустимое значение угла между направлениями КАИ – КО и КАИ – Луна, при котором не наступает засветка БОЭА, °	3
Минимально допустимое значение угла между направлениями КАИ – КО и КАИ – лимб Земли, при котором не наступает засветка БОЭА, °	3
Максимальная дальность обнаружения КО целевой аппаратурой КАИ, км	4000
Количество КАИ	16
Высота круговых орбит, км	850
Наклонение плоскостей орбит КАИ, °	99
Количество орбитальных плоскостей	2
Количество КАИ в каждой орбитальной плоскости	8
Аргумент широты первого КАИ в первой орбитальной плоскости в начальный момент времени, °	0
Аргумент широты первого КАИ во второй орбитальной плоскости в начальный момент времени, °	22.5
Прямое восхождение восходящего узла первой орбитальной плоскости, °	0
Прямое восхождение восходящего узла второй орбитальной плоскости, °	45

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье показана возможность определения положения КО без построения ортогональной системы координат x_{e1} , x_{e2} , $y_{e1(2)}$ на основе плоскостей матричных фотоприемных устройств КАИ (см. рис. 1). Предложенный подход к определению параметров движения КО позволяет существенно увеличить область пространства, в пределах которой возможно решение данной задачи.

Полученные результаты целесообразно учесть в текущих [13] и перспективных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах в интересах создания системы мониторинга и информационного обеспечения безопасности космической деятельности в околоземном космическом пространстве на период 2020–2025 гг. и на перспективу до 2030 г. [14].

Список используемых источников

1. Orbital Debris Quarterly News. – 2020. – Vol. 24, is. 2. – 12 p.
2. Последствия первого «космического ДТП» будут сказываться еще 30 лет // РИА новости. – URL: <https://ria.ru/space/20140210/994117885.html> (дата обращения: 01.10.2018).
3. *Половников В. И., Скутницкий В. М.* Теоретические основы проектирования орбитальных систем космической триангуляции. – СПб.: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2012. – 175 с.
4. *Трещалин А. П.* Применение оптико-электронной аппаратуры космических аппаратов для предварительного определения параметров орбит околоземных космических объектов // Труды МФТИ. – 2012. – Т. 4, № 3. – С. 122–131.
5. *Фадин И. А., Янов С. В., Самохвалов О. А.* Методика обоснования баллистической структуры орбитального сегмента системы мониторинга космического пространства // Вест-

ник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2019. – Т. 18, № 3. – С. 155–165.

6. *LeGrand K.* Initial Relative Orbit Determination Using Stereoscopic Imaging Gaussian Mixture Models // 27th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites. – 2013.

7. *Самотохин А. С., Хуторовский З. Н.* Метод первоначального определения параметров околоземных орбит по трем угловым измерениям // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. – 2014. – № 44.

8. Космический мусор: в 2 кн. / под науч. ред. Г. Г. Райкунова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – Кн. 1: Методы наблюдения и модели космического мусора. – 248 с.

9. *Левкина П. А.* Физические и орбитальные характеристики объектов космического мусора по данным оптических наблюдений : дисс. ... канд. физ.-мат. наук. – М., 2016. – 123 с.

10. Characteristics of Orbit Determination with Short-Arc Observation by an Optical Tracking Network, OWL-Net / *Jin Choi* [et al.] // Hindawi International Journal of Aerospace Engineering. – 2018. – Article ID 2837301.

11. *Howard Curtis.* Orbital Mechanics for Engineering Students. – Florida: Embry-Riddle Aeronautical University, 2005. – 411 p.

12. *Кустудов А. Ю., Павлов В. П.* Определение траекторий космических объектов по оптическим измерениям в зонах двойного обзора с наземных пунктов // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2017. – № 6. – С. 25–32.

13. Единая информационная система в сфере закупок: официальный сайт. – URL: <https://zakupki.gov.ru/epz/order/notice/ok44/common-info.html?regNumber=0995000000216000042> (дата обращения: 25.09.2020).

14. РОСКОСМОС: официальный сайт. – URL: <https://www.roscosmos.ru/27855> (дата обращения: 23.11.2020).

Е. А. Новиков*,
доктор технических наук, доцент;
А. С. Севостьянов*;
Е. А. Степанова**

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

**16 ЦНИИ МО РФ, г. Мытищи Московской обл.

МОДЕЛЬ ОБСЛУЖИВАНИЯ МУЛЬТИСЕРВИСНОГО ТРАФИКА СО СЛОЖНОЙ СТРУКТУРОЙ В СЕТИ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ В УСЛОВИЯХ КОНФЛИКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СЛОЖНЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Представлен метод аналитического расчета системы массового обслуживания на основе гипердельтной аппроксимации произвольных плотностей распределений. Разработана имитационная модель системы массового обслуживания с интенсивностью поступления трафика, распределенного по Парето-закону, и интенсивностью обслуживания пакетов, распределенной по гамма-закону.

Ключевые слова: система массового обслуживания, гипердельтная аппроксимация, гамма-распределение, распределение Парето.

ВВЕДЕНИЕ

Известно большое количество работ, посвященных исследованиям сложных конфликтно-устойчивых систем, предназначенных для функционирования в условиях динамического взаимодействия при слабо предсказуемом поведении противоположной стороны. В работах [1, 2] к таким системам относятся сложные радиотехнические системы (СРТС), которые функционируют в условиях конфликтного взаимодействия.

Аспекты конфликтного взаимодействия СРТС достаточно хорошо проработаны на основе различных теорий, таких как теории активных систем, теории динамических систем, теории марковских процессов, в том числе полумарковских и вложенных марковских процессов, теории дифференциальных игр, теории игр, теории сетей Петри, теории автоматов, теории сложных иерархических систем, теории логики, теории многоагентного моделирования, теории графодинамических многоагентных триадных сетей, теории нечетких множеств. Однако существующие подходы не позволяют произвести аналитический расчет пропускной способности сети спутниковой связи в условиях конфликтного взаимодействия при обслуживании трафика со сложной структурой.

Исследование пропускной способности сети спутниковой связи, как правило, основывается на расчете системы массового обслуживания (СМО). Во многих работах при расчете СМО длительность интервалов времени между поступлением заявок и длительность обслуживания заявок считают распределенными по экспоненциальному закону ввиду простоты аналитического расчета. Однако в реальных сетях связи поступающий трафик характеризуется достаточно сложной структурой и не может быть аппроксимирован экспоненциальным законом. Среди вероятностных распределений, подходящих для описания трафика со сложной структурой, принято выделять распределение Парето. В то время как случайная величина длительности интервала времени, необходимого на передачу пакета трафика в условиях конфликтного взаимодействия радиотехнических систем, может быть аппроксимирована гамма-распределением, как показано в работе [3].

Целью работы являлось исследование пропускной способности сети спутниковой связи в условиях конфликтного взаимодействия СРТС при ограничениях на качество обслуживания трафика со сложной структурой.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ МУЛЬТИСЕРВИСНОГО ТРАФИКА В УСЛОВИЯХ КОНФЛИКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Вопросы исследования процесса конфликтного взаимодействия СРТС достаточно подробно изложены в работе [3]. Концептуальная модель конфликтного взаимодействия представлена на рис. 1.

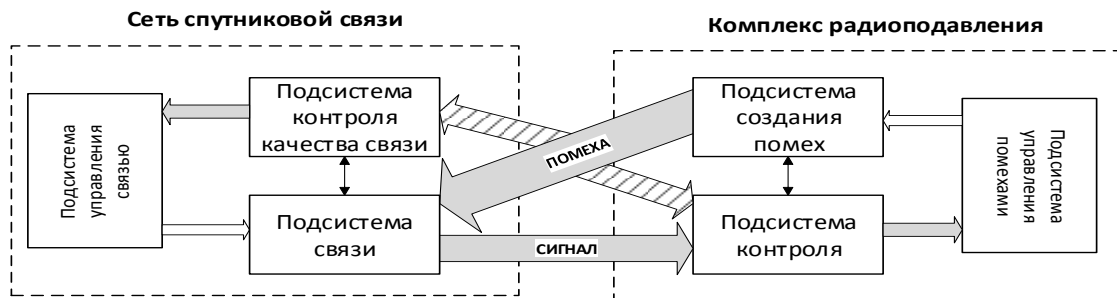


Рис. 1. Концептуальная модель процесса конфликтного взаимодействия СРТС

В статье [3] показано, что время задержки передачи сообщения в канале связи в условиях конфликтного взаимодействия СРТС может быть аппроксимировано гамма-распределением с параметрами $\alpha \geq 0$ и $\lambda \geq 0$ (график функции плотности распределения для различных параметров α представлен на рис. 2):

$$f_{\gamma}(x) = \begin{cases} \frac{\lambda^{\alpha}}{\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\lambda x}, & x > 0; \\ 0, & x < 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $\Gamma(\alpha)$ – гамма-функция.

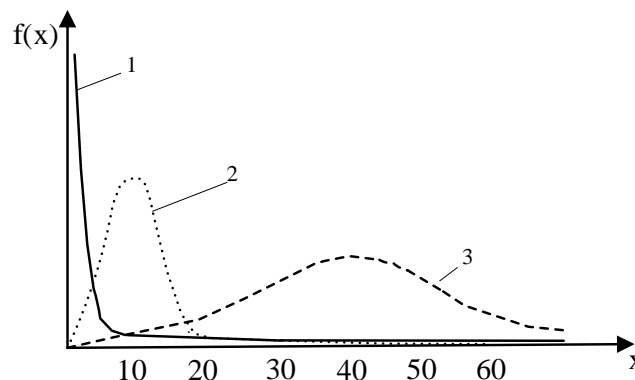


Рис. 2. Плотность гамма-распределения, полученная для различных значений α :
1 – 0,5; 2 – 1,5; 3 – 2,5

Вместе с тем структура трафика, поступающего на земную станцию спутниковой связи, не может быть адекватно описана с использованием экспоненциального распределения. Подхо-

ды к моделированию структуры мультисервисного трафика в современных сетях связи системно изложены в работе О. И. Шелухина [4]. Среди вероятностных распределений, подходящих для описания трафика со сложной структурой, принято выделять распределение Парето [5, 6], функция плотности которого задается соотношением

$$f_{Pa}(x) = \frac{kx_m^k}{x^{k+1}}, \quad (2)$$

где k – параметр формы распределения Парето;

x_m – параметр масштаба распределения Парето.

С точки зрения теории телетрафика аналитический расчет одноканальной системы обслуживания трафика с длительностью обслуживания, распределенной по гамма-закону, и длительностью интервалов времени между пакетами, распределенной по закону Парето распределения, существенно затруднен. В то же время известен подход, позволяющий получить приближенную аппроксимацию произвольной функции плотности распределения суперпозицией дельта-функций распределения, разработанный В. А. Смагиным [7–9]. Применение такого подхода к аппроксимации функции плотности гамма-распределения и Парето-распределения открывает широкие возможности к аналитическому расчету и синтезу систем обслуживания трафика со сложной структурой. Рассмотрим СМО (рис. 3), описываемую в нотации Кендала следующим образом: Pa/g/1/N.

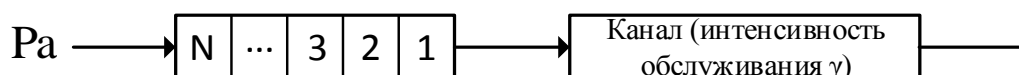


Рис. 3. Система массового обслуживания Pa/g/1/N

Требуется найти минимальное значение пропускной способности функционирования СМО в условиях конфликтного взаимодействия СРТС, которое обеспечивало бы вероятность отказа не хуже требуемой ($P_{отк} \leq P_{отк.треб}$). То есть

$$\mu \xrightarrow{P_{отк} \leq P_{отк.треб}} \min, \quad (3)$$

где μ – интенсивность обслуживания.

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА НЕМАРКОВСКОЙ МОДЕЛИ ОДНОКАНАЛЬНОЙ НЕСТАЦИОНАРНОЙ СИСТЕМЫ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

Как правило, для расчета СМО принято использовать подход, основанный на построении графа марковской цепи с последующим решением системы уравнений Колмогорова – Чепмана. В рассматриваемом случае с учетом принятых распределений вероятностей такой подход не может быть использован. В этой связи предлагается применить подход к расчету системы Pa/g/1/N, основанный на построении системы уравнений баланса в изображениях Лапласа. Соответствующий граф в изображениях Лапласа показан на рис. 4. На графе приняты следующие обозначения: символы $*$ и s означают изображение Лапласа и комплексную переменную Лапласа, $a^*(s)$ – изображение Лапласа функции плотности Парето распределения, $b^*(s)$ – изображение Лапласа функции плотности гамма-распределения, α – условная вероятность поступления нового пакета, β – условная вероятность обслуживания текущего пакета.

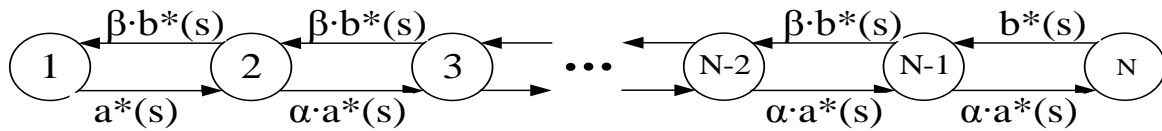


Рис. 4. Граф состояний одноканальной СМО в изображениях Лапласа

Условные вероятности задаются следующими соотношениями:

$$\alpha = \int_0^{\infty} (1 - B(x)) dA(x) = \int_0^{x_m} \left(1 - \frac{\theta^k \int_0^x t^{k-1} e^{-\theta t} dt}{\Gamma} \right) dx + \int_{x_m}^{\infty} \left(1 - \frac{\theta^k \int_0^x t^{k-1} e^{-\theta t} dt}{\Gamma} \right) \frac{kx_m^k}{x^{k+1}} dx; \quad (4)$$

$$\beta = \int_0^{\infty} (1 - A(x)) dB(x) = \int_0^{x_m} \left[\frac{\theta^k (x^{k-1} e^{-\theta x})}{\Gamma(k)} \right] dx + \int_{x_m}^{\infty} \left[1 - \left(1 - \frac{x_m^k}{x^k} \right) \right] \cdot \frac{\theta^k (x^{k-1} e^{-\theta x})}{\Gamma(k)} dx, \quad (5)$$

где

$$A(x) = 1 - \left(\frac{x_m^k}{x^k} \right) \text{ и } B(x) = \frac{\theta^k \int_0^x t^{k-1} e^{-\theta t} dt}{\Gamma(k)}$$

– функции Парето-распределения и гамма-распределения соответственно.

Система уравнений баланса для графа состояний одноканальной СМО, представленной в изображениях Лапласа, выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} a^*(s)P_1^*(s) = \beta b^*(s)P_2^*(s); \\ (\alpha a^*(s) + \beta b^*(s))P_2^*(s) = a^*(s)P_1^*(s) + b^*(s)P_3^*(s); \\ \vdots \\ b^*(s)P_N^*(s) = \alpha a^*(s)P_{N-1}^*(s); \\ \sum_{i=0}^N P_i^*(s) = \frac{1}{s}, \end{cases} \quad (6)$$

где

$$\sum_{i=0}^N P_i^*(s) = \frac{1}{s}$$

– условие нормирования изображений вероятностей.

Решив систему уравнений (6), получим выражения для вероятностей состояний системы в изображениях Лапласа:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 P_1^*(s) = \frac{1}{s} \left[1 + \frac{\alpha^{N-2} a^*(s)^{N-1}}{\beta^{N-2} b^*(s)^{N-1}} + \sum_{i=1}^{N-2} \frac{\alpha^{i-1} a^*(s)^i}{\beta^i b^*(s)^i} \right]^{-1}; \\
 P_2^*(s) = \frac{1}{s} \left[\frac{\beta b^*(s)}{a^*(s)} + \frac{\alpha^{N-2} a^*(s)^{N-2}}{\beta^{N-3} b^*(s)^{N-2}} + \sum_{i=1}^{N-2} \left(\frac{\alpha a^*(s)}{\beta b^*(s)} \right)^{i-1} \right]^{-1}; \\
 \vdots \\
 P_{n=3, N-2}^*(s) = \frac{1}{s} \left[\frac{\beta^{N-n} b^*(s)^{N-n}}{\alpha^{N-n-1} a^*(s)^{N-n}} + \frac{\alpha^{n-1} a^*(s)^{n-1}}{\beta^{n-2} b^*(s)^{n-1}} + \sum_{i=1}^{N-2} \left(\frac{\alpha a^*(s)}{\beta b^*(s)} \right)^{n-1-i} \right]^{-1}; \\
 \vdots \\
 P_{N-1}^*(s) = \frac{1}{s} \left[\frac{\alpha a^*(s)}{b^*(s)} + \frac{\beta^{N-2} b^*(s)^{N-2}}{\alpha^{N-3} a^*(s)^{N-2}} + \sum_{i=1}^{N-2} \left(\frac{\beta b^*(s)}{\alpha a^*(s)} \right)^{i-1} \right]^{-1}; \\
 P_N^*(s) = \frac{1}{s} \left[1 + \frac{\beta^{N-2} b^*(s)^{N-1}}{\alpha^{N-2} a^*(s)^{N-1}} + \sum_{i=1}^{N-2} \frac{\beta^{i-1} b^*(s)^i}{\alpha^i a^*(s)^i} \right]^{-1}; \\
 \sum_{i=0}^N P_i^*(s) = \frac{1}{s}.
 \end{array} \right. \quad (7)$$

Используя подход на основе гипердельтной аппроксимации произвольных плотностей распределений, получим выражения для функций плотностей Парето и гамма-распределений. Для этого предварительно необходимо определить первые три начальных момента используемых распределений:

$$v_s = \int_0^{\infty} x^s f(x) dx, \quad (8)$$

где s – порядок начального момента.

Далее, используя полученные моменты распределений, определим соотношения для поиска коэффициентов гипердельтной аппроксимации плотностей гамма-распределения и Парето-распределения с использованием метода моментов:

$$C_1 + C_2 = 1; \quad C_1 T_1 + C_2 T_2 = v_1; \quad C_1 T_1^2 + C_2 T_2^2 = v_2; \quad C_1 T_1^3 + C_2 T_2^3 = v_3, \quad (9)$$

которые имеют следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 C_1 = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{(3v_2 v_1 - v_3 - 2v_1^3)}{\sqrt{v_3^2 - 6v_3 v_2 v_1 - 3v_2^2 v_1^2 + 4v_3 v_1^3 + 4v_2^3}} \right]; \\
 C_2 = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{(3v_2 v_1 - v_3 - 2v_1^3)}{\sqrt{v_3^2 - 6v_3 v_2 v_1 - 3v_2^2 v_1^2 + 4v_3 v_1^3 + 4v_2^3}} \right];
 \end{array} \right. \quad (10)$$

$$T_1 = \frac{v_3 - v_2 v_1 - \sqrt{v_3^2 - 6v_3 v_2 v_1 - 3v_2^2 v_1^2 + 4v_3 v_1^3 + 4v_2^3}}{2(v_2 - v_1^2)};$$

$$T_2 = \frac{v_3 - v_2 v_1 + \sqrt{v_3^2 - 6v_3 v_2 v_1 - 3v_2^2 v_1^2 + 4v_3 v_1^3 + 4v_2^3}}{2(v_2 - v_1^2)}.$$
(11)

Аппроксимированные плотности вероятностей используемых законов распределений определяются в соответствии с соотношением

$$f_{\text{ан}}(t) = C_1 \Delta(t - T_1) + C_2 \Delta(t - T_2),$$
(12)

где $\Delta(t - T)$ – дельта-функция Дирака со смещением T .

К формулам аппроксимированных плотностей вероятности применим преобразование Лапласа и получим следующие выражения плотностей вероятности в изображениях Лапласа:

$$a^*(s) = L[f_{\text{ан}}^{Pa}(t)] = C_1^{Pa} e^{-T_1^{Pa}s} + C_2^{Pa} e^{-T_2^{Pa}s}; b^*(s) = L[f_{\text{ан}}^{\gamma}(t)] = C_1^{\gamma} e^{-T_1^{\gamma}s} + C_2^{\gamma} e^{-T_2^{\gamma}s}.$$
(13)

Используя формулы Алфрея [10], можно перейти от изображений Лапласа (13) к приближенным выражениям, полученным относительно переменной времени:

$$f(t) \approx sf^*(t) \text{ при } s = \frac{1}{t}.$$
(14)

Получить систему уравнений баланса, решенную относительно переменной времени, можно путем следующих преобразований. Предварительно необходимо рассчитать соотношения для условных вероятностей (4) и (5), а также соотношения для плотностей распределений в изображениях Лапласа (13). Подставив получившиеся выражения в систему уравнений (7) и приведя подобные, производим замену переменной в соответствии с формулой Алфрея (14). Решение преобразованной системы уравнений (7) позволит получить конечные значения вероятностей состояний системы не только в стационарном режиме, но и в переходных нестационарных режимах.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ КАНАЛА СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ В УСЛОВИЯХ КОНФЛИКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ ОБСЛУЖИВАНИИ ТРАФИКА СО СЛОЖНОЙ СТРУКТУРОЙ

В качестве примера расчета модели СМО проведем исследование модели $Pa/g/1/3$, где длительность между пакетами поступающего трафика распределена по закону Парето с параметрами $k = 2.1$, $x_m = 0.01$ (соответствующий коэффициент вариации составит $v = 2.182$), а длительность обслуживания трафика распределена по гамма-закону с параметрами $k = 0.07$, $\theta = 2$. Параметры распределений подобраны таким образом, чтобы обеспечить вероятность отказа $P_{\text{отк}} \leq 0.01$. Средняя длительность между пакетами поступающего трафика составляет $\bar{t}_{Pa} = 0.019$ с, а средняя длительность обслуживания трафика составляет $\bar{t}_{\gamma} = 0.035$ с.

Результаты расчета соотношений (8), (10), (11), необходимых для получения конечных значений вероятностей состояний системы, сведены в табл. 1.

Выражения аппроксимированных плотностей в изображениях Лапласа соответствующих вероятностей находятся в соответствии с выражением (13) и имеют следующий вид:

$$a^*(s) = 0.017 \cdot e^{-1.05s} + 0.983 \cdot e^{-0.02s}; b^*(s) = 0.8 \cdot e^{-0.04s}.$$
(15)

Таблица 1

**Результаты расчета соотношений для расчета вероятностей СМО
с заданными параметрами**

Название характеристики	α	β	Параметры аппроксимации			
			C_1	C_2	T_1	T_2
Условные вероятности	0.189	0.814	-	-	-	-
Распределение Парето	-	-	0.8	0.2	0.4	-0.064
Гамма-распределение	-	-	0.017	0.983	1.052	0.018
	Начальные моменты					
	Первый начальный момент ν_1	Второй начальный момент ν_2	Третий начальный момент ν_3			
Распределение Парето	0.019	$2.1 \cdot 10^{-3}$	$-2.333 \cdot 10^{-6}$			
Гамма-распределение	0.035	0.019	0.02			

Осуществляя подстановки и преобразования, описанные в предыдущем разделе, получим систему уравнений для выражения вероятностей состояний:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_1(t) = \frac{c_1}{c_1 + 0.01 \cdot c_2^4 + c_3 \cdot c_4 + c_5 \cdot c_2^2 + c_6 \cdot c_2^3}; \\ P_2(t) = \frac{c_3 \cdot c_4}{c_1 + 0.01 \cdot c_2^4 + c_3 \cdot c_4 + c_5 \cdot c_2^2 + c_6 \cdot c_2^3}; \\ P_3(t) = \frac{c_5 \cdot c_2^2}{c_1 + 0.01 \cdot c_2^4 + c_3 \cdot c_4 + c_5 \cdot c_2^2 + c_6 \cdot c_2^3}; \\ P_4(t) = \frac{c_6 \cdot c_2^3}{c_1 + 0.01 \cdot c_2^4 + c_3 \cdot c_4 + c_5 \cdot c_2^2 + c_6 \cdot c_2^3}; \\ P_5(t) = \frac{0.01 \cdot c_2^4}{c_1 + 0.01 \cdot c_2^4 + c_3 \cdot c_4 + c_5 \cdot c_2^2 + c_6 \cdot c_2^3}, \end{array} \right. \quad (16)$$

где

$$\begin{aligned} c_1 &= 0.22 \cdot e^{-\frac{0.16}{t}}, \quad c_2 = 0.02 \cdot e^{-\frac{1.05}{t}} + 0.98 \cdot e^{-\frac{0.02}{t}}, \quad c_3 = 0.51 \cdot e^{-\frac{0.12}{t}}, \\ c_4 &= 0.01 \cdot e^{-\frac{1.05}{t}} + 0.65 \cdot e^{-\frac{0.02}{t}}, \quad c_5 = 0.098 \cdot e^{-\frac{0.08}{t}}, \quad c_6 = 0.03 \cdot e^{-\frac{0.04}{t}}. \end{aligned}$$

Графики зависимости вероятностей состояний СМО, полученные в результате аналитического моделирования, представлены на рис. 5.

Для проверки результатов аналитического моделирования использовалась имитационная модель СМО, построенная на основе программного продукта *Matlab/Simulink/Stateflow* [11]. Модель состоит из трех диаграмм состояний (Chart): «Источник», «Буфер» и «Канал» (рис. 6).

В диаграмме состояний «Источник» (рис. 7,а) имитируется генерация трафика с длительностью интервалов времени между пакетами, распределенной по закону Парето.

Диаграмма состояний «Канал» (рис. 7,б) включает в себя модели комплекса радиосвязи (рис. 8) и комплекса радиоподавления (рис. 9). В момент занятия канала имитируется передача трафика в условиях конфликтного взаимодействия сложных радиотехнических систем.

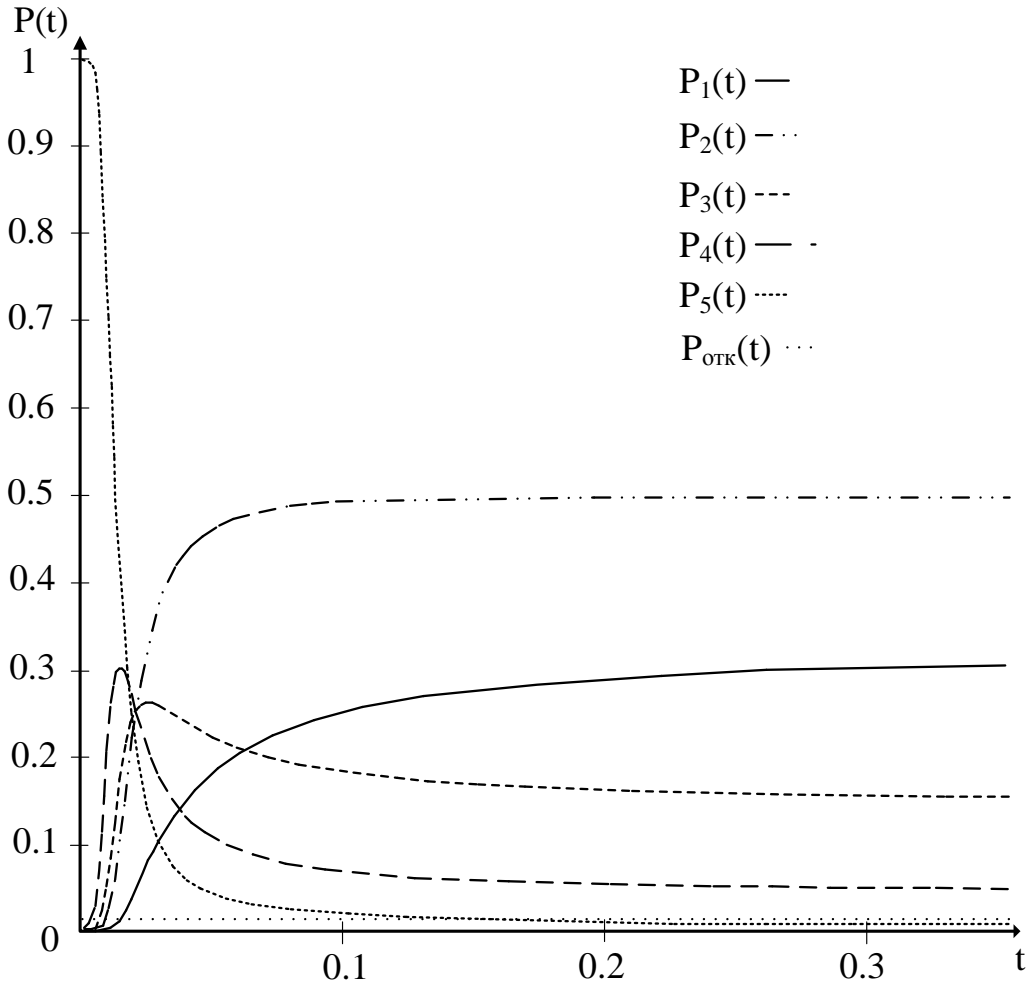


Рис. 5. Вероятности состояний СМО $M_a/g/1/3$, полученные при помощи гипердельтной аппроксимации

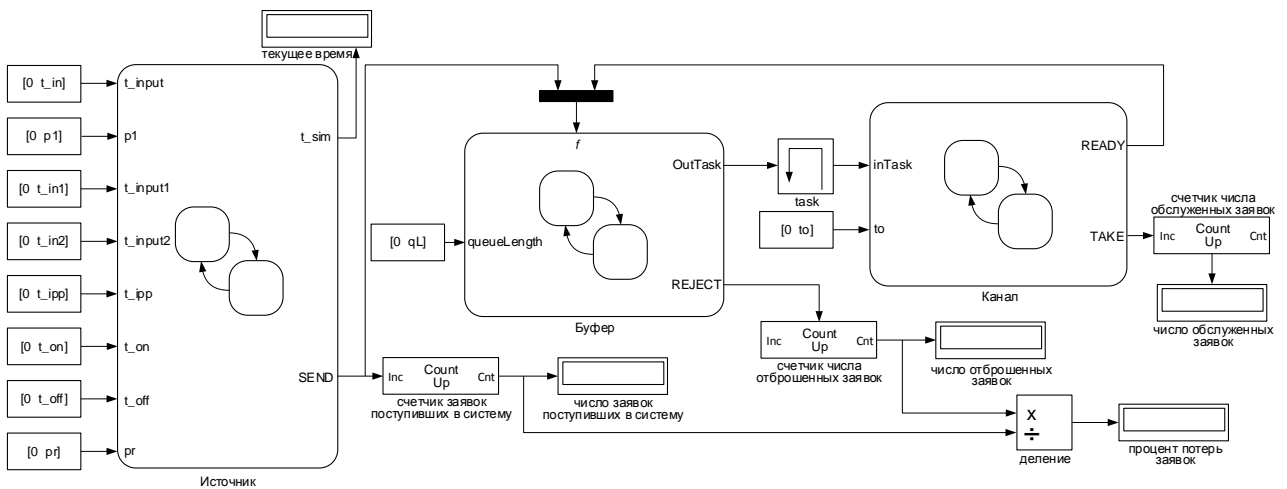


Рис. 6. Модель генерации и обслуживания трафика сложной структуры

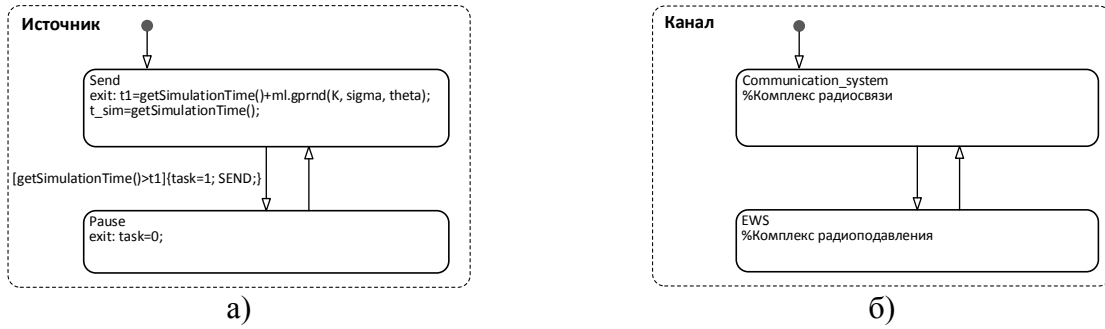


Рис. 7. Диаграмма состояний «Источник» (а) и «Канал» (б)

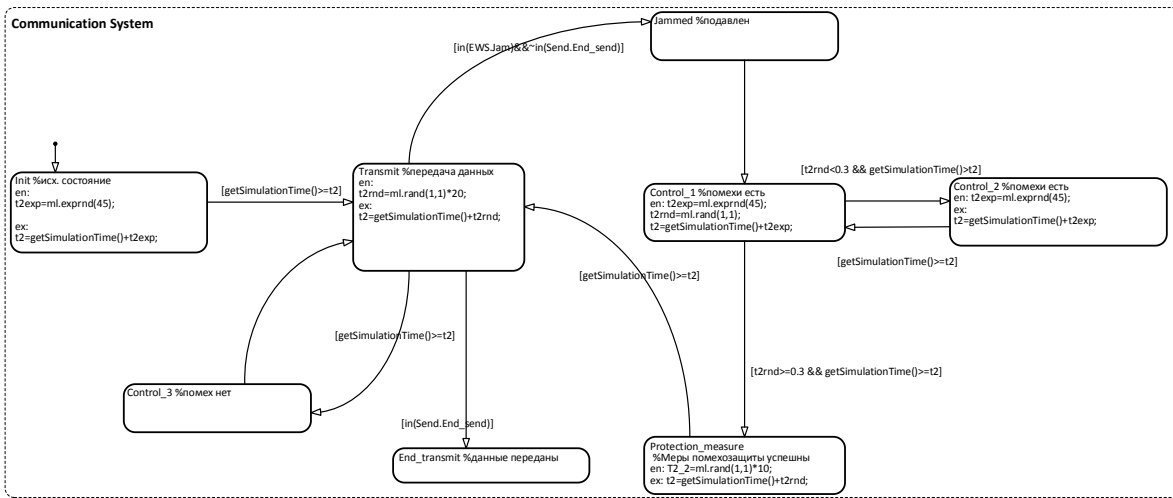


Рис. 8. Модель комплекса радиосвязи в диаграмме «Канал»

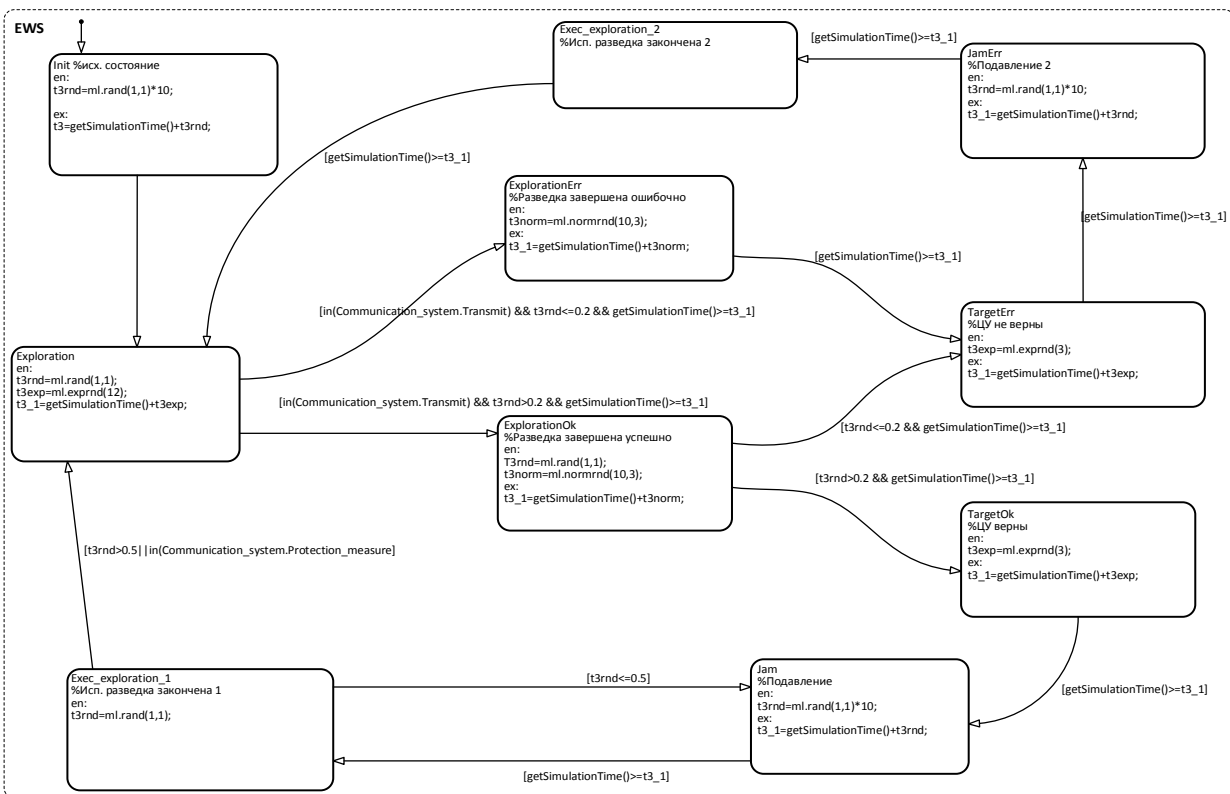


Рис. 9. Модель комплекса радиоподавления в диаграмме «Канал»

Используя в качестве параметров среднюю длительность между пакетами поступающего трафика $\bar{t}_{Pa} = 0.019$ с и среднюю длительность обслуживания трафика $\bar{t}_y = 0.035$ с, были проведены расчеты вероятности потери пакетов с использованием имитационной модели.

Результаты расчета вероятности потери пакетов для заданных параметров представлены на рис. 10.

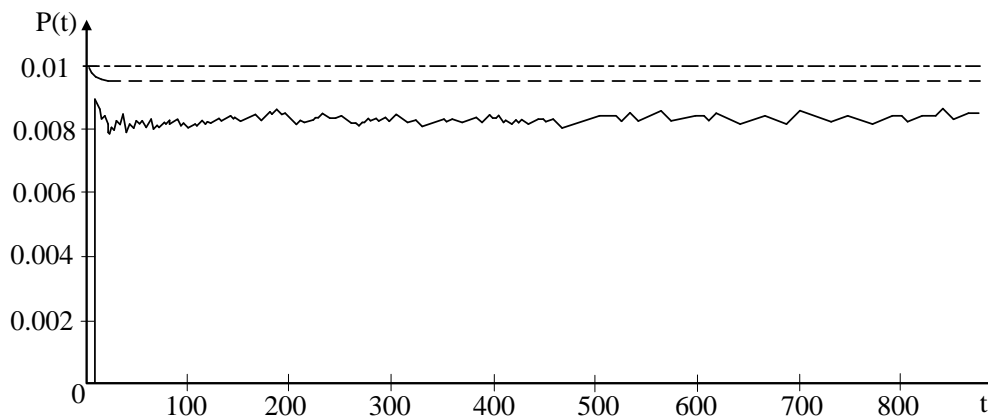


Рис. 10. Вероятность потери пакетов для одноканальной системы. Штрихпунктирная линия – требуемая вероятность потери, пунктирная линия – вероятность потери пакетов, найденная при помощи гипердельтной аппроксимации, сплошная линия – вероятность потери пакетов, полученная при помощи имитационного моделирования

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в работе результаты аналитического и имитационного моделирования системы обслуживания трафика в условиях конфликтного взаимодействия сложных радиотехнических систем показали идентичные значения вероятности потери пакета с разницей порядка 2-3%. Это позволяет сделать вывод о том, что аналитическая модель адекватна реальным процессам, протекающим в СМО. Разработанная модель на основе гипердельтной аппроксимации позволяет получить параметры СМО и оценить своевременность передачи пакетов мультисервисного трафика в условиях конфликтного взаимодействия сложных радиотехнических систем.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на изучение влияния изменения вероятностных характеристик подсистем СРТС на пропускную способность канала спутниковой связи в условиях конфликтного взаимодействия с применением полученных аналитической и имитационной моделей.

Список используемых источников

1. Дружинин В. В., Конторов Д. С., Конторов М. Д. Введение в теорию конфликта – М.: Радио и связь, 1989. – 288 с.
2. Куприянов А. И., Сахаров А. В. Радиотехнические системы в информационном конфликте. – М.: Вузовская книга, 2003. – 528 с.
3. Мальцев Г. Н., Вознюк В. В., Туктамышев М. Р. Моделирование конфликта сложных радиотехнических систем методом параллельных развивающихся стохастических процессов // Информационно-управляющие системы. – 2013. – № 5(66). – С. 26–33.

4. *Шелухин О. И.* Мультифракталы. Инфокоммуникационные приложения. – М.: Горячая линия-Телеком, 2011. – 576 с.
5. *Одоевский С. М., Бусыгин А.В.* Аналитическая модель обслуживания мультимедийного трафика с распределением Парето на основе аппроксимации результатов имитационного моделирования // Системы управления, связи и безопасности. – 2020. – № 1. – С. 74–108. – DOI: 10.24411/2410-9916-2020- 10104.
6. *Рыжиков Ю. И.* Теория очередей и распределение Парето // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2015. – Вып. 648. – С. 103–111.
7. *Смагин В.А., Филимоныхин Г.В.* О моделировании случайных процессов на основе гипердельтного распределения // Автоматика и вычислительная техника. – 1990. – № 1. – С. 25–31.
8. *Смагин В.А., Гусеница Я.Н.* Моделирование одноканальных нестационарных систем обслуживания, представленных циклическим графом состояний // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2016. – Т. 59, № 10. – С. 801–806.
9. *Смагин В. А.* Коррекция гипердельтного распределения в теории случайных процессов // Интеллектуальные технологии на транспорте. – 2015. – № 2. – С. 26–31.
10. *Смагин В. А.* Немарковские задачи теории надежности. – Л.: МО СССР, 1982. – 269 с.
11. *Зиннуров С. Х., Новиков Е. А., Степанова Е. А.* Моделирование процессов генерации и обслуживания трафика со сложной структурой с использованием программного комплекса логико-событийного моделирования MATLAB/SIMULINK/STATEFLOW // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2020. – Вып. 675. – С. 69–76.

П. Н. Топчий

СИНХРОНИЗАЦИЯ В ЦИФРОВЫХ РАДИОПРИЕМНЫХ СИСТЕМАХ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ШУМОПОДОБНЫХ ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ

В статье описан алгоритм цифрового поиска и синхронизации по частоте и фазе программно-определяемых радиосистем SDR. Специфика реализации организации канала передачи информации в устройствах USRP не позволяет применять готовые решения, основанные на подстройке схемами частотной и фазовой синхронизации частоты управляемого генератора. Предложено решение, позволяющее при неуправляемом опорном генераторе осуществлять процессы синхронизации в системах с фазовой манипуляцией.

Ключевые слова: программно-определяемая радиосистема, Software Defined Radio (SDR), универсальное программное периферийное радио, Universal Software Radio Peripheral (USRP), поиск и синхронизация по частоте и фазе.

ВВЕДЕНИЕ

При создании цифровых систем передачи информации по радиоканалу для демодуляции сигналов необходима система синхронизации. Для систем передачи информации понятие «синхронизация» характеризует соответствие между параметрами принимаемого сигнала (несущей частотой, фазой, временной задержки) и состоянием приемного устройства (демодулятора, декодера). При использовании фазовой манипуляции требуется синхронизация по частоте и фазе несущей или промежуточной частоты принимаемого сигнала и опорного генератора (гетеродина), а также тактовой синхронизации.

Для создания новых приемных и передающих систем требуется проведение натуральных экспериментов с различными, достаточно сложными видами модуляции радиосигналов. Теоретические наработки должны быть подтверждены натурными экспериментами, что приводит к необходимости иметь достаточно гибкую платформу, позволяющую быстро создавать и тестировать предлагаемые решения в области выбора видов модуляции сигнала, организации связи и использования тех или иных протоколов обмена информацией.

Для решения большинства задач можно использовать различные программно-определяемые радиосистемы. Программно-определяемая радиосистема (Software Defined Radio, SDR) – это радиосистема, в которой функции физического уровня частично или полностью задаются программно [1, 2]. Для управления SDR и создания алгоритмов генерации и обработки сигналов используются различные среды программирования, позволяющие получить доступ к порту подключения устройства. Созданные алгоритмы реализуются на цифровом сигнальном процессоре, микроконтроллере, ПЛИС или персональном компьютере.

Применение программно-определяемых радиосистем NI USRP и среды программирования LabVIEW позволяет получить высокую функциональность и гибкость разрабатываемых устройств. Кроме того, в результате этого применения формируется платформа для быстрого прототипирования (включая разработку протоколов физического уровня), записи и воспроизведения радиосигнала, радиоэлектронной разведки, валидации алгоритмов и многого другого.

В настоящее время разработано достаточно большое количество устройств, реализующих принцип SDR, работающих в достаточно большом (до 6 ГГц) диапазоне волн, – это приемопередатчики AD9361, HackRF, BladeRF, UmTRX, USRP B100 Starter, USRP B200. Компания *National Instruments* предлагает линейку устройств USRP (*Universal Software Radio*

Peripheral) – USRP-2900, USRP-2901, USRP-2920, USRP-2921, USRP-2922, USRP-2930, USRP-2932, – которые отличаются частотным диапазоном, портом соединения с компьютером, наличием встроенной ПЛИС, модуля GPS и другими деталями.

Типовая схема USRP устройства [1] показана на рис. 1.

Платформа USRP включает в себя аппаратную часть в виде приемника, передатчика NI USRP и необходимое программное обеспечение. Подключение NI USRP к хост-компьютеру создает программно-определяемую радиосистему. Поступающие сигналы микшируются приемником непосредственного преобразования для получения узкополосных квадратурных компонент (I/Q), которые дискретизируются аналого-цифровым преобразователем (ADC). Оцифрованные I/Q данные в тракте цифрового преобразования с понижением частоты (DDC) фильтруются и подвергаются децимации. Прореженные отсчеты передаются на хост-компьютер. Задача программной части – обеспечить непрерывный обмен компонентами сигнала между компьютером и USRP устройством. Если при приеме радиосигнала не успеть изъять из буфера полученные отсчеты, то они будут потеряны, что в некоторых случаях приведет к потере части информации.

Все схемы синхронизации по частоте и фазе предполагают наличие управляемого генератора и работают в аналоговом режиме. При использовании систем SDR (программно-определяемых радиосистем) часто разработчик не имеет возможности подстраивать генератор в режиме реального времени, что видно из схемы USRP NI-2900 (рис. 1). Требования к стабильности задающих генераторов также вступают в противоречие с необходимостью подстройки по частоте и фазе к принимаемому сигналу.

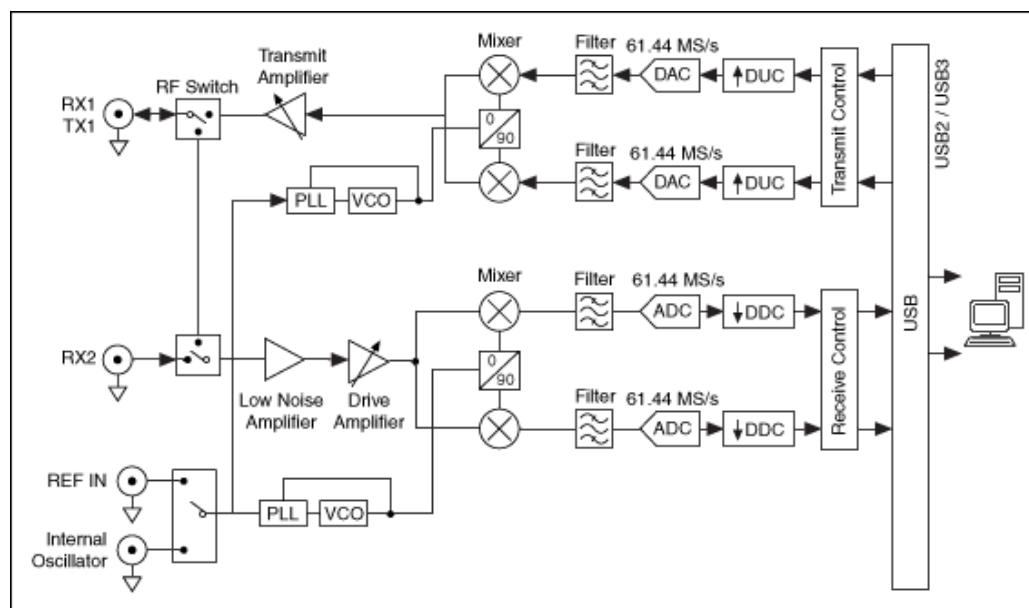


Рис. 1. Блок-схема USRP-2900

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Теория приема сигналов основана на наличии в приемнике данных о положении тактовых моментов цифрового сообщения, т. е. требуется применение системы тактовой синхронизации. Также для выделения информационной составляющей необходимо знать частоту и фазу несущей принимаемого сигнала, для чего используется система синхронизации по несущей приемного устройства. Однако работа систем синхронизации резко усложняется наличием манипуляции сигнала заранее неизвестным на приемной стороне информационным сообще-

нием. При этом при фазовой манипуляции изменяется именно тот параметр, который требуется восстановить.

При использовании систем с расширением спектра радиопередачи должна работать с заданным качеством при отношении сигнал/шум, измеренном в основной полосе сигнала менее 1. Таким образом, функционирование систем синхронизации существенно усложняется наличием манипуляционных и шумовых помех.

Схема синхронизации по несущей (СН) формирует гармоническое колебание, совпадающее по частоте и по фазе с колебанием несущей (или промежуточной) частоты принимаемого сигнала. Как правило, в режиме слежения СН выделяет опорное колебание, обрабатывая информационный сигнал. Алгоритм слежения реализуется на основе схемы ФАП, которая должна выделить из спектра принимаемого сигнала гармонику несущей частоты f_0 .

С точки зрения передачи двоичной информации наиболее помехоустойчивой является система, использующая противоположные сигналы, которые формируются в результате фазовой модуляции (ФМ) несущего колебания с углом манипуляции $\varphi_i = \pi$. В этом случае вся мощность передатчика тратится только на информационные составляющие спектра, гармоника несущей частоты f_0 в спектре отсутствует, и ФАП не может осуществить ни захват, ни слежение.

Задача состоит в разработке математического аппарата, позволяющего осуществлять цифровыми методами поиск и слежение по частоте и фазе за несущей сигнала с расширенным спектром без изменения настроек задающего генератора системы.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ЦИФРОВОГО ПОИСКА И СИНХРОНИЗАЦИИ ПО ЧАСТОТЕ И ФАЗЕ ПРОГРАММНО-ОПРЕДЕЛЯЕМЫХ СИСТЕМ

Существуют различные способы синхронизации, позволяющие преодолеть указанную выше особенность противоположных сигналов. Например, угол манипуляции выбирается из условия $\varphi_i < \pi$, что приводит к появлению в спектре сигнала гармоники несущей частоты f_0 , которая выделяется схемой ФАП. Однако в результате перераспределения фиксированной мощности передатчика мощность информационных составляющих сигнала в спектре уменьшается, что приведет к снижению отношения сигнал/шум на выходе интегратора приемника и к увеличению вероятности ошибки.

Широкое распространение получил способ, основанный на восстановлении несущего колебания в приемнике при использовании противоположных сигналов с углом манипуляции $\varphi = \pi$. К настоящему времени разработано большое число различных вариантов СН с восстановлением несущей [3, 4]. Некоторые из них известны по фамилиям авторов: схема Пистолькорса (рис. 2), Сифорова, Костаса (рис. 3), Агеева [4]. В предложенных решениях осуществляется нелинейное преобразование, в результате которого устраняется фазовая модуляция несущей информационным сигналом.

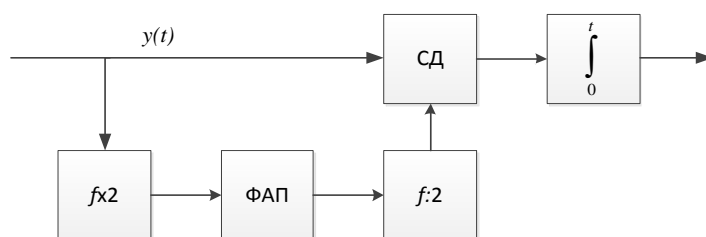


Рис. 2. Схема синхронизации по несущей с удвоением частоты, где СД – синхронный детектор; ФАП – управляемый генератор фазовой подстройки частоты

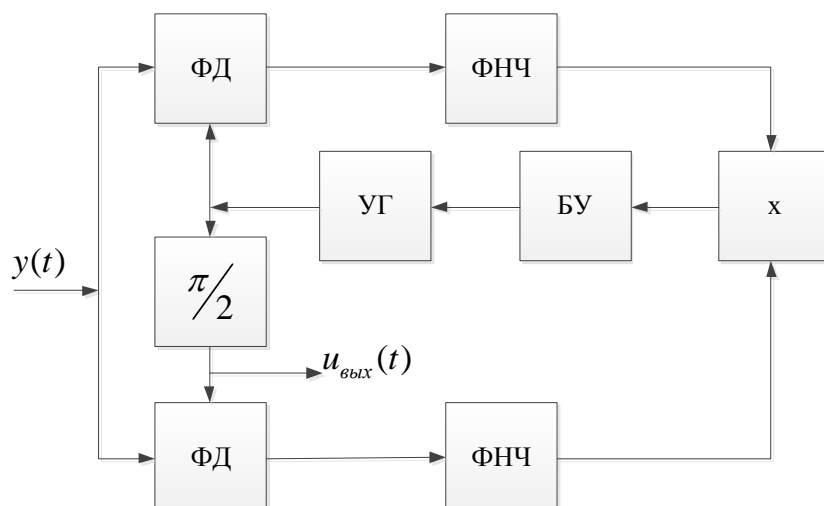


Рис. 3. Схема синхронизации Костаса, где ФД – фазовый детектор; ФНЧ – фильтр нижней частоты; УГ – управляемый генератор; БУ – блок управления

Несмотря на простоту данные схемы имеют ряд недостатков:

- применение для восстановления несущей нелинейного устройства, что приводит к подавлению слабого сигнала при малых отношениях сигнал/шум на входе;

- при делении частоты на два, из-за неконтролируемых начальных условий деления, начальная фаза гармонического опорного колебания может случайным образом принимать одно из двух значений: 0 или π . В результате информационные символы на выходе синхронного детектора инвертируются, что в итоге приводит к возникновению групповой ошибки.

Для борьбы с групповыми ошибками применяют относительную фазовую манипуляцию.

При цифровой обработке сигнала необходимый сдвиг по частоте и фазе достигается с помощью математической операции умножения принятого комплексного сигнала, состоящего из квадратур, на комплексную переменную $e^{-i\Delta\omega t + \Delta\varphi}$.

Сигнал на входе программно-определяемой радиосистемы (входы RX1 или RX2 на рис. 1) представляет собой высокочастотное колебание с модуляцией одного или нескольких параметров полезной информацией. В случае с фазовой манипуляцией этим параметром является фаза сигнала

$$u(t) = A \cos(2\pi(f_H + f_0(t))t + \varphi(t) + \varphi_0(t)) + U_{\text{ш}}(t),$$

- где
- A – амплитуда принятого сигнала;
 - f_H – несущая частота сигнала;
 - $\varphi(t)$ – фаза сигнала, манипулируемая информационным сигналом на π (BPSK),
 $\varphi(t) = c(t)\pi$;
 - $c(t)$ – информационный сигнал, принимающий значения «0» или «1»;
 - $f_0(t)$ – ошибка частоты сигнала, возникающая из-за доплеровского смещения, нестабильности задающих генераторов или вследствие других причин;
 - $\varphi_0(t)$ – ошибка фазы сигнала, возникающая из-за времени распространения сигнала, состояния среды распространения и вследствие других причин;
 - $U_{\text{ш}}(t)$ – напряжение, определяющее уровень естественных и искусственных шумов в канале распространения радиосигнала.

После прохождения входных цепей и управляемого высокочастотного усилителя-аттенюатора сигнал попадает на квадратурный смеситель. На выходе смесителя формируются квадратурные компоненты сигнала:

$$U_c(t) = [A(t) \cos(2\pi(f_H + f_0(t))t + \varphi(t) + \varphi_0(t))] \cos(2\pi f_\Gamma),$$

$$U_s(t) = [A(t) \cos(2\pi(f_H + f_0(t))t + \varphi(t) + \varphi_0(t))] [-\sin(2\pi f_\Gamma)],$$

где $U_c(t)$ – косинусная квадратурная компонента комплексной огибающей принятого сигнала;

$U_s(t)$ – синусная квадратурная компонента комплексной огибающей принятого сигнала;

f_Γ – частота гетеродина.

После смесителя полосовые фильтры удаляют высокочастотные составляющие с частотами $f_H + f_\Gamma$.

На аналого-цифровые преобразователи (АЦП) поступают квадратурные компоненты сигнала:

$$U_c(t) = A(t) \frac{1}{2} [\cos(2\pi(f_H - f_\Gamma + f_0(t))t + \varphi(t) + \varphi_0(t))],$$

$$U_s(t) = A(t) \frac{1}{2} [\sin(2\pi(f_H - f_\Gamma + f_0(t))t + \varphi(t) + \varphi_0(t))].$$

В SDR устройствах применяют обработку на «нулевой» частоте, т. е. $f_H = f_\Gamma$, тогда квадратурные компоненты примут вид:

$$U_c(t) = A(t) \frac{1}{2} [\cos(2\pi(f_0(t))t + c(t)\pi + \varphi_0(t))],$$

$$U_s(t) = A(t) \frac{1}{2} [\sin(2\pi(f_0(t))t + c(t)\pi + \varphi_0(t))].$$

После АЦП получаем отсчеты квадратур с установленной частотой дискретизации:

$$U_c(nT) = A(nT) \frac{1}{2} [\cos(2\pi(f_0(nT))nT + c(nT)\pi + \varphi_0(nT))],$$

$$U_s(nT) = A(nT) \frac{1}{2} [\sin(2\pi(f_0(nT))nT + c(nT)\pi + \varphi_0(nT))].$$

где n – номер отсчета;

T – интервал дискретизации $T = 1/F_d$.

Отсчеты попадают в устройство обработки через порт, к которому подключено SDR в виде набора отсчетов.

Представим сигнал, записанный в виде квадратур, в виде комплексного сигнала в показательной форме:

$$\dot{u}(n) = U_c(n) + iU_s(n) = \frac{1}{2} A(n) e^{i(2\pi(f_0(n))n + c(n)\pi + \varphi_0(n))},$$

$$\dot{u}(n) = \frac{1}{2} A(n) e^{c(n)\pi} e^{i(2\pi(f_0(n))n + \varphi_0(n))}.$$

где $e^{c(n)\pi}$ – информационная составляющая, принимает значения ± 1 , при этом

$$(c(n) = 0 \rightarrow e^{i(c(n)\pi)} = 1, c(n) = 1 \rightarrow e^{i(c(n)\pi)} = -1);$$

$e^{i(2\pi(f_0(n))n + \varphi_0(n))}$ – множитель, возникающий при сдвиге частоты и фазы.

Введем полезный сигнал в виде

$$s(n) = e^{i(c(n)\pi)},$$

Для обработки цифровых сигналов на вычислительной технике удобно использовать аппарат дискретного преобразования Фурье (ДПФ), при котором спектр сигналов в частотной области является линейчатым.

Интервалы между отсчетами в частотной области зависят от длительности обрабатываемого сигнала. Если сигнал дискретизирован с периодом дискретизации T , длительность сигнала $T_c = NT$, то расстояние между отсчетами частоты

$$\Delta f = 1/T_c = 1/NT.$$

Тогда комплексный сигнал примет вид

$$\dot{u}(n) = s(n)e^{i\frac{2\pi}{N}k_0n} e^{i\varphi_0(n)},$$

где комплексный множитель $e^{i\frac{2\pi}{N}k_0n}$ обусловлен сдвигом по частоте, а $e^{i\varphi_0(n)}$ определяет задержку по времени.

Используем свойства ДПФ: сдвиг (задержка) N -точечной последовательности и сдвиг (смещение) в частотной области. Полезный сигнал, а следовательно, и его спектр известны. При использовании прямого расширения спектра псевдослучайной последовательностью максимальной длины модуль спектра сигнала имеет вид, представленный на рис. 4,а. В случае поступления на вход приемного устройства сигнала, сдвинутого относительно требуемого на частоту сдвига \hat{f}_0 ($\hat{f}_0 \leq \frac{1}{2}f_d$ по требованию теоремы Котельникова) наблюдается спектр, представленный на рис. 4,б.

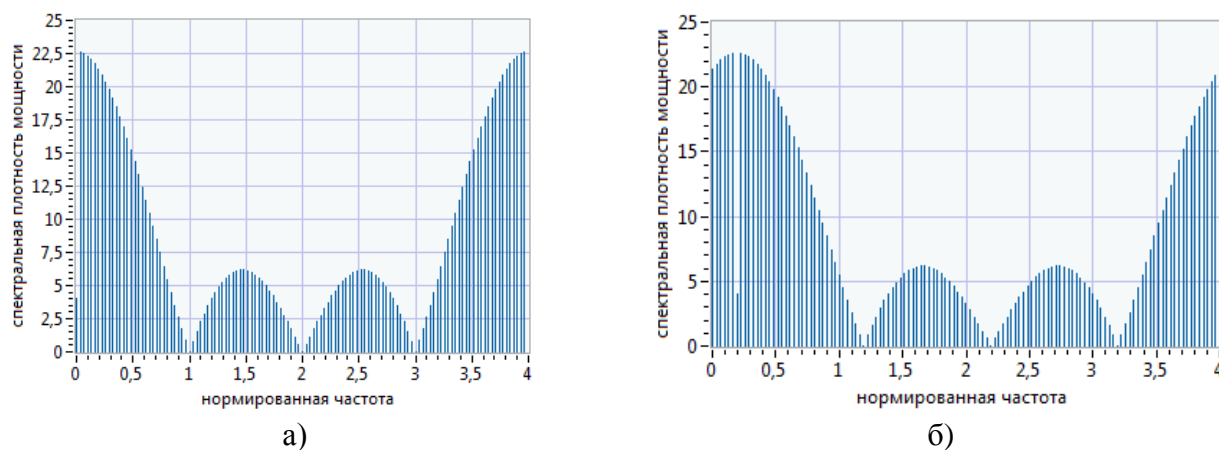


Рис. 4. Модуль частотного спектра:
а – эталонного сигнала; б – принятого сигнала

Проведя свертку спектра принятого сигнала со спектром эталонного сигнала, получаем максимальный отклик на частоте сдвига (рис. 5).

Используя связь номера отсчета с частотой, можно вычислить частотный сдвиг принятого сигнала, и умножив принятую последовательность (рис. 6,а) на комплексную последовательность $e^{-i\frac{2\pi}{N}k_0n}$, можно получить исходный информационный сигнал (рис. 6,б).

Ошибка определения частоты сдвига принимаемого сигнала определяется длительностью сигнала и частотой дискретизации (количеством отсчетов):

$$|\hat{f}_0| \leq \frac{\Delta \hat{f}}{2},$$

где \hat{f}_0 – нормированная ошибка $\hat{f}_0 = f_0 / f_d$;

$\Delta \hat{f}$ – нормированный интервал между отсчетами частоты.



Рис. 5. Результат свертки в частотной области

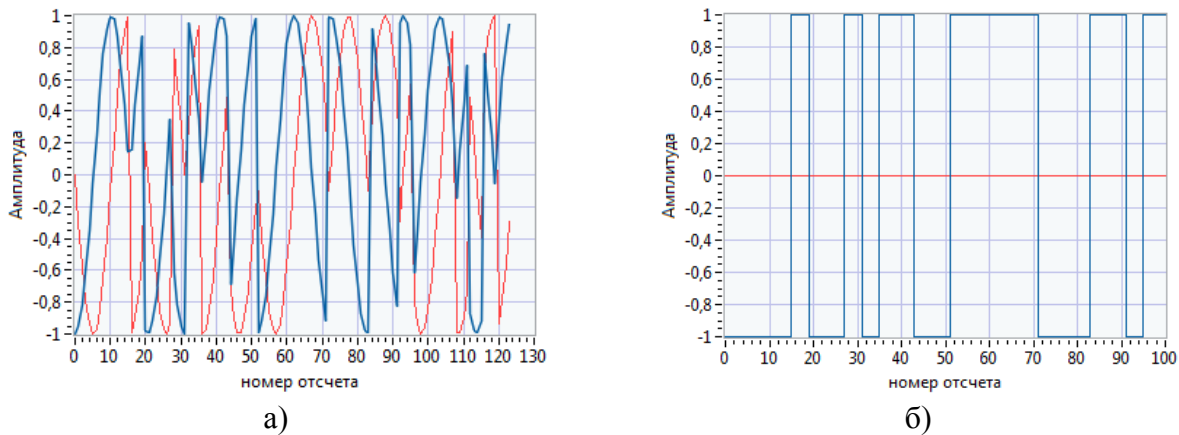


Рис. 6. Принятый сигнал:
а – до обработки; б – после обработки

При этом при максимальной ошибке на длительность принимаемого сигнала придется только половина периода частоты ошибки (рис. 7,а).

Применяя систему фазовой автоподстройки, ошибка в определении частоты устраняется (рис. 7,б).

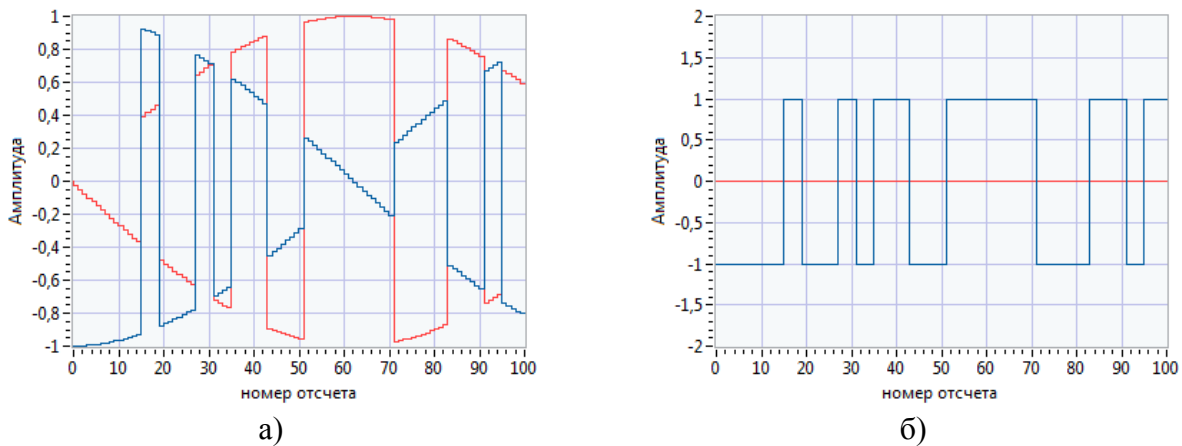


Рис. 7. Результат обработки при максимально возможной ошибке:
а – после системы ЧАП; б – после фазовой подстройки

Обработка сигнала с помощью коррелятора позволяет выделить информационную составляющую передаваемого сигнала. Момент принятия решения определяется длительностью сигнала в отсчетах (рис. 8).

Используя свойство ДПФ о сдвиге во времени программным способом, учитывается задержка принимаемого сигнала во времени, что позволяет осуществить поиск и слежение за задержкой ПСП. При наличии в канале шума предложенные решения позволяют выделять сигнал при $\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \geq 5$ дБ (рис. 9).

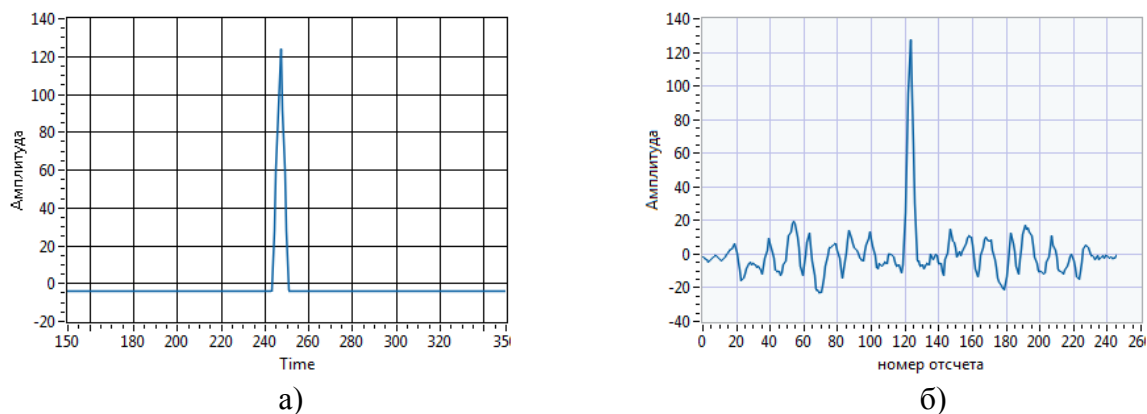


Рис. 8. Сигнал на выходе коррелятора:
а – без шума; б – в реальном канале

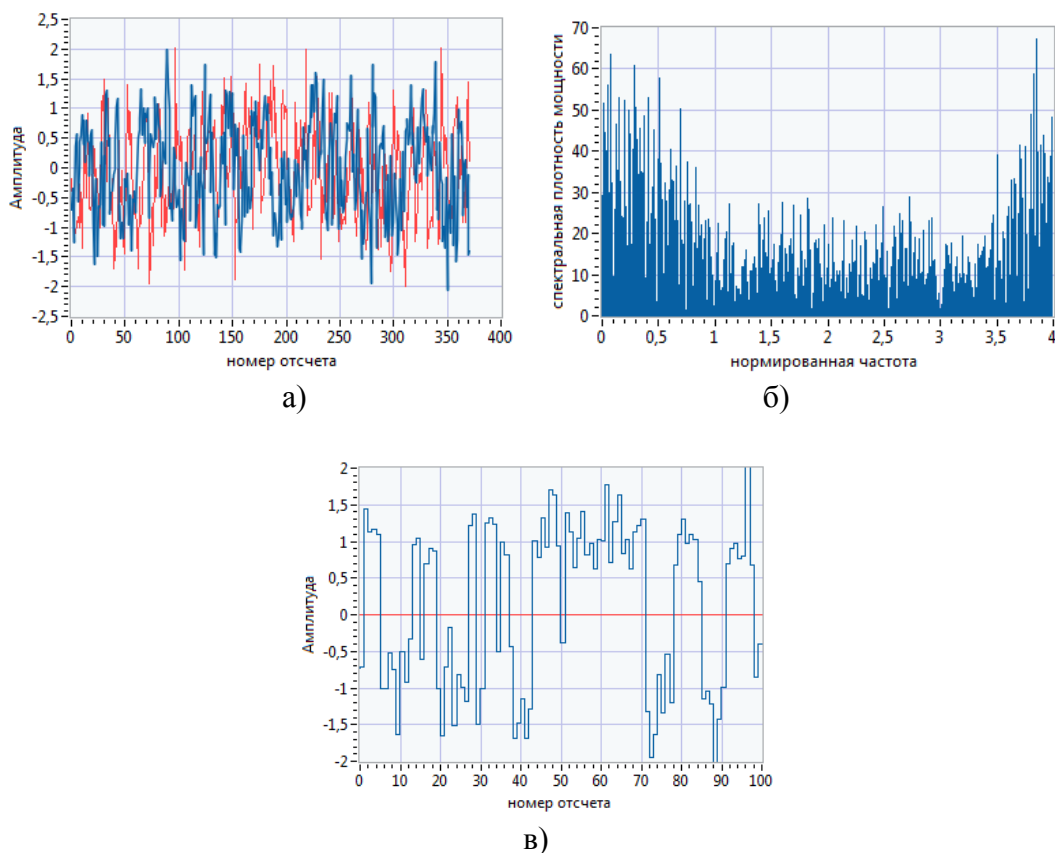


Рис. 9. Принятый сигнал:
а – до обработки; б – модуль частотного спектра; в – результат обработки
после фазовой подстройки

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение предложенных решений в цифровых устройствах приема информации позволяет реализовать процессы поиска и синхронизации по частоте, фазе и задержке по времени методами обработки сигнала без необходимости управления задающим генератором. Перенос процессов синхронизации из аппаратной части в программную позволяет:

- упростить реализацию приемных устройств;
- повысить стабильность задающих генераторов;
- обладать большей гибкостью в обработке сигналов, чем при использовании классических аналоговых методов.

Список используемых источников

1. SDRF Cognitive Radio Definitions. Working Document SDRF-06-R-0011-V1.0.0. – URL: http://www.sdrforum.org/pages/documentLibrary/documents/SDRF-06-R-0011-V1_0_0.pdf (дата обращения: 30.08.2021).
2. Брюс А. Блэк Введение в системы радиосвязи: Лабораторные работы с NI USRP и LabVIEW Communications. – URL: <http://www.ntspress.com/publications/usrp-labs.pdf>. (дата обращения: 25.08.2021).
3. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение: пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
4. Фомин А. И. Синхронизация цифровых радиосистем передачи информации. – М.: САЙНС–ПРЕСС, 2008. – 80 с.
5. Умняшкин С. В. Основы теории цифровой обработки сигналов: учеб. пособие. – М.: Техносфера, 2016. – 528 с.

В. Ф. Алексеев,
доктор технических наук, профессор;
 В. Ю. Андриевская,
кандидат физико-математических наук, доцент;
 Т. Н. Данилова

О ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АНОМАЛИЙ ВЫСОТ СОВРЕМЕННЫМИ МОДЕЛЯМИ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

В статье приводятся результаты исследований по контролю точности аномалий высот, вычисленных с использованием цифровых моделей гравитационного поля Земли на эталонном полигоне, созданном методом спутникового нивелирования. Кроме того, рассматриваются результаты сравнения аномалий высот, вычисленных в одноименных точках с использованием различных моделей. Обосновывается необходимость вывода отечественных моделей гравитационного поля Земли с порядком и степенью гармонических коэффициентов, равных не менее 2000.

Ключевые слова: потенциал силы тяжести, возмущающий геопотенциал, гравитационное поле Земли, квази-геоид, аномалия высоты, сферические гармоники, нивелирование, цифровая модель, среднее квадратическое расхождение.

ВВЕДЕНИЕ

Для определения характеристик аномального гравитационного поля Земли в настоящее время широко применяются численно-аналитические модели в виде нормированных коэффициентов разложения потенциала силы тяжести в ряд по сферическим функциям. При использовании таких моделей возмущающий геопотенциал T для точек на поверхности Земли и во внешнем пространстве вычисляется по формуле [1]

$$T(\rho, \varphi, \lambda) = \frac{fM}{\rho} \sum_{n=2}^N \left(\frac{a}{\rho} \right)^n \sum_{m=0}^n (\Delta \bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\sin \varphi). \quad (1)$$

Для определения значений высот квазигеоида в заданных пунктах может быть использована формула

$$\zeta(\rho, \varphi, \lambda) = \frac{fM}{\rho\gamma} \sum_{n=2}^N \left(\frac{a}{\rho} \right)^n \sum_{m=0}^n (\Delta \bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\sin \varphi); \quad (2)$$

В приведенных уравнениях используются следующие обозначения:

φ, λ – геодезические координаты (широта и долгота) пункта;

ρ – радиус вектор пункта;

n, m – целые числа;

$\Delta \bar{C}_{n,m}, \bar{S}_{n,m}$ – нормированные коэффициенты и функции Лежандра гравитационного поля;

$\bar{P}_{nm}(\sin \varphi)$ – полностью нормированные полиномы Лежандра, значения которых вычисляются по формулам [1]:

$$\bar{P}_{nm}(\sin \varphi) = \begin{cases} \bar{P}_{n-1,m-1}(\sin \varphi) \cos \varphi \sqrt{\frac{2n+1}{2n}} \frac{1}{\delta_{m-1}} & \text{при } n = m \neq 0, \\ \bar{P}_{n-1,m}(\sin \varphi) \sin \varphi \sqrt{\frac{4n^2-1}{n^2-m^2}} - \bar{P}_{n-2,m}(\sin \varphi) \times \\ \times \sqrt{\frac{[(n-1)^2-m^2](2n+1)}{(n^2-m^2)(2n-3)}} & \text{при } n > m, \\ 0 & \text{при } n < m, \\ 1 & \text{при } n = m = 0, \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{где } \delta_m = \begin{cases} \frac{1}{2} & \text{при } m = 0, \\ 1 & \text{при } m \neq 0. \end{cases}$$

Анализ цифровых моделей, которые создают отечественные и зарубежные специалисты, в виде разложения возмущающего потенциала в ряд по сферическим функциям показывает, что сохраняется тенденция к дальнейшему поэтапному повышению точности и подробности моделей на основе увеличения предельной степени учитываемых сферических гармоник. Так, модели, появившиеся в первой половине XX века, содержали гармоники до 6–8-й степени. Затем были созданы модели до 16-й, 32-й степени, а в 80–90-е годы – до 360 степени. В настоящее время самыми современными зарубежными моделями гравитационного поля являются EGM2008, EIGEN-6C4, описывающие коротковолновую структуру гравитационного поля до 2190 степени.

Для определения допустимости применения той или иной модели при решении специальных задач необходимо оценить точность восстановления трансформант гравитационного поля с их помощью. В настоящей статье приводятся результаты контроля точности определения аномалий высот современными отечественными и зарубежными цифровыми моделями в виде нормированных коэффициентов разложения потенциала силы тяжести в ряд по сферическим функциям.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО КОНТРОЛЮ ТОЧНОСТИ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Контроль точности цифровых моделей гравитационного поля Земли (ГПЗ) может быть выполнен двумя основными способами:

– путем сравнения исследуемой модели с аналогичными моделями, имеющими известные точностные характеристики. Сравнительные оценки можно получить по расхождениям вычисленных значений различных характеристик гравитационного поля;

– путем сопоставления расчетов по модели с результатами гравиметрических измерений, в том числе с данными детальной гравиметрической съемки, детальными характеристиками ГПЗ в Мировом океане, полученными методом спутниковой альтиметрии, а также по абсолютным и относительным значениям высот геоида, которые получают в результате выполнения спутниковых координатных определений в пунктах с известными нивелирными высотами.

Наиболее объективные оценки точности цифровых моделей ГПЗ возможно получить при использовании второго способа, т. е. путем сравнения параметров гравитационного поля в одноименных точках, вычисленных по модели, с результатами математической обработки гравиметрических измерений. Для его реализации в районе Новгородской области был со-

здан специальный полигон, на пунктах которого инструментально получены значения высот квазигеоида над поверхностью общеземного эллипсоида. Аномалии высот были вычислены на 43 пунктах государственной геодезической и нивелирной сетей, развитых в соответствии с требованиями, изложенными в работах [2, 3]. Значения нормальных высот на пунктах полигона были получены методом геометрического нивелирования III–IV классов (на 10 пунктах – методом тригонометрического нивелирования), они изменялись в пределах от 75 до 221 м. На этих же пунктах выполнялись измерения плановых координат и геодезических высот спутниковой аппаратурой геодезического класса точности «Торсон GB-500». Далее методом спутникового нивелирования (сопоставления геодезических и нормальных высот) определялись эталонные значения аномалий высот. Статистические характеристики эталонных значений аномалий высот приведены в табл. 1.

Таблица 1

Статистические характеристики эталонных значений высот квазигеоида, полученных методом спутникового нивелирования

Характеристика	Значение
Минимальное значение высоты квазигеоида, м	15,61
Максимальное значение высоты квазигеоида, м	18,01
Среднее значение высот квазигеоида, м	16,89
Среднее квадратическое значение высот квазигеоида, м	16,90
Наибольшее превышение высот квазигеоида, м	2,4

Для экспериментальных исследований были выбраны современные зарубежные модели гравитационного поля Земли EGM2008 и EIGEN-6C4-2 [4], а также отечественная модель, входящая в состав системы геодезических параметров «Параметры Земли 1990 года» (ПЗ-90.11) [5].

Эталонные значения сравнивались в одноименных точках с результатами расчетов, выполненных с применением исследуемых моделей. Результаты вычислений для каждой цифровой модели представлены на рис. 1. Анализ графиков показывает, что высоты квазигеоида, вычисленные с использованием цифровых моделей, имеют отчетливо выраженные систематические отклонения от эталонных данных. В выполненных экспериментах «модельные» высоты практически всегда были меньше эталонных.

Наименьший систематический сдвиг 0,34 м получен для модели EGM2008. Для моделей EIGEN-6C4-2 и ПЗ-90 эта величина составила 0,38 и 0,61 м соответственно. Такой сдвиг, как показывают оценки, приведенные в табл. 2, во многом определяют величины средних квадратических отклонений вычисленных значений аномалий высот от эталонных значений. Полученные оценки позволяют заключить, что модели EGM2008 и EIGEN-6C4-2 обеспечивают примерно одинаковую точность восстановления аномалий высот на уровне 0,5 м в спокойных в гравиметрическом отношении районах Земли. Погрешности высот квазигеоида, вычисленные с использованием модели ПЗ-90, находятся на уровне 0,7–1,0 м даже в слабоаномальных районах Земли.

Таблица 2

Результаты сравнения высот квазигеоида, вычисленных с использованием цифровых моделей, с эталонными данными

Характеристика	Модель, сравниваемая с эталонной		
	EGM2008	ПЗ-90	EIGEN-6C4-2
Среднее квадратическое отклонение, м	0,45	0,70	0,49
Минимальное отклонение, м	-0,56	-0,25	-0,52
Максимальное отклонение, м	0,68	1,06	0,75
Минимальное абсолютное отклонение, м	0,08	0,18	0,04
Максимальное абсолютное отклонение, м	0,68	1,06	0,75

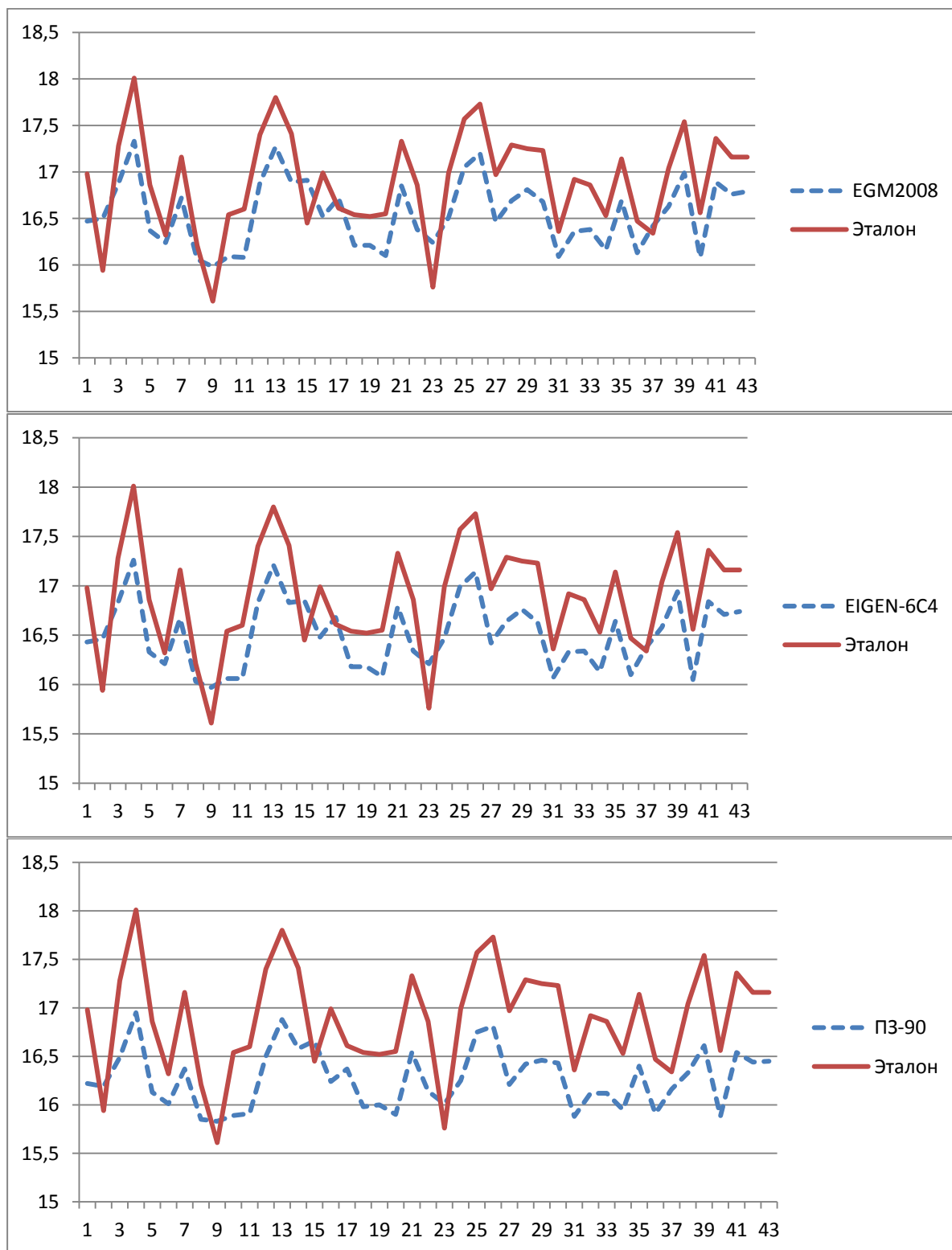


Рис. 1. Значения эталонных и вычисленных с использованием различных цифровых моделей аномалий высот

В ходе экспериментальных исследований оценивалась сходимость высот квазигеоида, вычисленных с использованием различных моделей. Всего было выбрано 250 точек квазиравномерно распределенных по земной поверхности. В горных районах (в Северной и Южной Америке, Азии и Европе со значениями нормальных высот от 2000 до 5000 метров) было вы-

брано 40 точек. Результаты сравнения аномалий высот, вычисленных с применением различных моделей в горных районах, представлены в табл. 3.

Таблица 3

**Средние квадратические расхождения значений высот квазигеоида (м),
вычисленных в одноименных точках с использованием
различных моделей в горных районах Земли**

Название модели	EGM2008	ПЗ-90	EIGEN-6C4-2
EGM2008		1.61	0.16
ПЗ-90	1.61		1.70
EIGEN-6C4-2	0.16	1.70	

Для дальнейших исследований было выбрано 210 точек в широтных поясах от 80 градусов северной до 80 градусов южной широты. Нормальные высоты исследуемых точек имели значения от 0 до 700 м. Результаты сравнения аномалий высот в таких районах, вычисленных с применением различных моделей, представлены в табл. 4.

Таблица 4

**Средние квадратические расхождения значений высот квазигеоида (м),
вычисленных в одноименных точках с использованием
различных моделей**

Название модели	EGM2008	ПЗ-90	EIGEN-6C4-2
EGM2008		0.66	0.18
ПЗ-90	0.66		0.69
EIGEN-6C4-2	0.18	0.69	

Анализ полученных результатов позволяет сделать ряд выводов.

Высоты квазигеоида, вычисленные с использованием цифровых моделей EGM2008 и EIGEN-6C4-2, достаточно хорошо согласуются между собой. Причем это справедливо как для горных, характеризующихся повышенной аномальностью гравитационного поля, так и для спокойных в гравиметрическом отношении районов Земли. Средние квадратические расхождения аномалий высот, вычисленные с использованием указанных выше моделей, составили порядка 0,18 м.

Результаты определения аномалий высот, полученные с использованием цифровой модели ПЗ-90, существенно отличаются от данных, вычисленных при применении других моделей. Так, средние квадратические расхождения высот квазигеоида в горных районах Земли достигали до 1,6 м, а в спокойных в гравиметрическом отношении районах Земли – до 0,70 м. Полученные оценки можно объяснить прежде всего недостаточностью пространственного разрешения модели ПЗ-90, учитывающей гармонические коэффициенты только до 360-й степени и порядка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исходя из результатов выполненных экспериментальных исследований, можно сделать вывод, что актуальным направлением для решения специальных задач, выполняемых Топографической службой Вооруженных Сил Российской Федерации, становится дальнейшее совершенствование модели представления потенциала силы тяжести рядом сферических функций ПЗ-90 с целью повышения ее точности и подробности на основе увеличения степени учитываемых сферических гармоник. Вероятно, при решении практических задач следует

использовать модели гравитационного поля Земли с числом гармонических коэффициентов, равным не менее 2000.

Такие высокостепенные модели могут быть получены по результатам совместной математической обработки детальных гравиметрических данных, а также измерений, выполненных перспективным отечественным космическим геодезическим комплексом ГЕО-ИКЗ. В составе этого комплекса кроме космического аппарата с высокоточным радиовысотометром планируется наличие низкоорбитального спутника с гравитационным градиентометром и/или межспутниковое траекторное слежение (по линиям «низкий – высокий», «низкий – низкий»).

Список используемых источников

1. *Огородова Л. В., Шимбирев Б. П., Юзефович А. П.* Гравиметрия. – М.: Недра, 1978. – 325 с.
2. Инструкции по нивелированию I, II, III и IV классов. ГКИНП (ГНТА) – 03-010-03. – М.: Картгеоцентр-Геодезиздат, 2004. – 244 с.
3. Инструкция о построении государственной геодезической сети СССР. ГКИНП-9. – М.: Недра, 1966. – 459 с.
4. Модели глобального гравитационного поля: электронная база данных. – URL: http://icgem.gfz-potsdam.de/tom_longtime (дата обращения: 2.06.2021).
5. Параметры Земли 1990 года (ПЗ-90.11): справочный документ. – М.: Военно-топографическое управление Генерального штаба Вооруженных Сил Российской Федерации, 2014. – 52 с.

А. В. Астапович,
кандидат технических наук, доцент;
Д. Д. Колесников,
кандидат технических наук;
Д. О. Медяников,
кандидат технических наук

МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ К ИЗМЕРЕНИЯМ ПРИ СОЗДАНИИ СПЕЦИАЛЬНЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

В статье излагается решение проблемы обоснования необходимой точности угловых и линейных измерений, а также числа приемов измерений и допусков при создании специальных геодезических сетей. Показано, что обоснование числа приемов должно базироваться на разделении погрешностей измерений на случайные и остаточные систематические ошибки. При этом планирование измерений необходимо осуществлять при условии пренебрегаемого влияния случайных ошибок на точность получаемых результатов. Приводятся необходимые доказательства и формулы для расчета числа приемов по заданной точности элементов геодезического построения и технических характеристик средства измерения. Даны необходимые выкладки для назначения допусков на размах варьирования результатов многократных измерений и невязки геометрических условий в линейно-угловых построениях.

Ключевые слова: специальная геодезическая сеть, планирование измерений, многократные измерения, число приемов измерений, среднее арифметическое значение, случайная ошибка, остаточная систематическая ошибка, точность измерений.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с увеличением разнообразности уникальных объектов, требующих нестандартного подхода к точности геодезической подготовки, нормативно-правовая документация на создание геодезических сетей специального назначения устарела, так как разрабатывалась на опыте использования в геодезическом производстве обычных теодолитов и светодальномеров. При этом число приемов и допустимых погрешностей измерений регламентировалось на основе опыта выполнения подобных работ и практических исследований средств измерений в геодезии, устаревших на данный момент.

В современных условиях при создании специальных геодезических сетей с использованием современных электронных тахеометров обоснование числа приемов и допустимых погрешностей измерений представляется актуальной задачей.

ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОЙ ТОЧНОСТИ УГЛОВЫХ И ЛИНЕЙНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Для расчета необходимой точности измерений в линейно-угловой сети воспользуемся известными в теории математической обработки геодезических измерений формулами оценки точности и среднего отношения весов [2]:

$$\begin{aligned} m &= \mu \sqrt{\frac{1}{P}}; \\ \left(\frac{p}{P}\right)_{\text{ср}} &= \frac{k}{n}, \end{aligned} \tag{1}$$

где m – средняя квадратическая ошибка оцениваемого элемента сети;
 μ – средняя квадратическая ошибка единицы веса;
 p – вес результатов измерений;
 P – вес оцениваемого элемента в сети после уравнивания измеренных величин;
 n – число всех измеренных величин;
 k – число необходимых измерений (величин).

Принимая в качестве единицы меры весов вес определения положения пункта сети по необходимым линейно-угловым измерениям, запишем формулу для оценки точности положения пунктов сети после уравнивания:

$$m_{x',y'} = \mu \sqrt{\frac{1}{P_{x',y'}}} = \mu \sqrt{\frac{k}{n}}. \quad (2)$$

Отсюда следует:

$$\mu = m_{x,y} = m_{x',y'} \sqrt{\frac{n}{k}}. \quad (3)$$

Число необходимых измерений для определения планового положения одного пункта сети равно двум. Так как координаты любого пункта сети определяются по линейно-угловым измерениям, выполненным на окружающих и определяемом пунктах, то для пункта, расположенного в самом слабом месте сети, число всех измеренных величин для определения координат составит

$$n = 3n' - 1, \quad (4)$$

где n' – число окружающих пунктов.

На величину $m_{x,y}$ оказывают влияние как ошибки линейных измерений, так и ошибки угловых измерений:

$$m_{x,y} = \sqrt{m_L^2 + m_Q^2},$$

где m_L – средняя квадратическая продольная ошибка;
 m_Q – средняя квадратическая поперечная ошибка.

Исходя из принципа равного влияния, на основании требуемой точности положения пунктов линейно-угловой сети получим допустимую продольную и поперечную погрешности положения пункта в самом слабом месте сети:

$$m_L = m_Q = \frac{m_{x,y}}{\sqrt{2}}. \quad (5)$$

Ошибки линейных измерений вызывают продольную ошибку положения пункта

$$m_L = m_d. \quad (6)$$

Ошибки угловых измерений вызывают поперечную ошибку положения пункта

$$m_Q = \frac{dm_\alpha}{\rho}. \quad (7)$$

Отсюда

$$m_\alpha = \frac{\rho m_Q}{d}. \quad (8)$$

В формулах (6)–(8) введены следующие обозначения: m_d – средняя квадратическая погрешность измерений длин сторон в сети, а m_α – средняя квадратическая погрешность измерений горизонтальных направлений в сети.

ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОГО ЧИСЛА ПРИЕМОВ УГЛОВЫХ И ЛИНЕЙНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Для обоснования необходимого числа приемов угловых и линейных измерений будем исходить из аддитивной структуры ошибок измерений

$$\theta = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \dots + \varepsilon_n + \upsilon_1 + \upsilon_2 + \dots + \upsilon_k, \quad (9)$$

где ε_i – элементарная случайная погрешность;

υ_i – элементарная остаточная (не исключаемая) систематическая ошибка.

Сумма элементарных случайных погрешностей обуславливает случайную долю Δ , а сумма элементарных остаточных ошибок формирует остаточную систематическую часть δ в истинной ошибке θ :

$$\theta = \Delta + \delta. \quad (10)$$

Поскольку структура ошибок измерений состоит из двух частей, то можно доказать [1], что основной критерий точности, определяемый как корень квадратный из математического ожидания квадрата истинной ошибки, отражает совместное влияние на точность измерений случайной и остаточной систематической ошибок:

$$m = \sqrt{m_{\Delta}^2 + m_{\delta}^2}, \quad (11)$$

где m_{Δ} – средняя квадратическая случайная ошибка;

m_{δ} – средняя квадратическая остаточная систематическая ошибка.

Следовательно, точность среднего арифметического из результатов многократных измерений должна оцениваться по величине средней квадратической ошибки

$$m_{\bar{x}} = \sqrt{m_{\Delta\bar{x}}^2 + m_{\delta\bar{x}}^2}, \quad (12)$$

где $m_{\Delta\bar{x}}$ – отражает влияние случайных ошибок измерений на точность среднего значения;

$m_{\delta\bar{x}}$ – отражает влияние остаточных систематических ошибок измерений на точность среднего значения.

При планировании измерений необходимо помнить, что каждое измерение – это затраты времени и ресурсов (трудовых, материальных, финансовых). Поэтому при определении числа приемов измерений надо учитывать тот факт, что окончательный результат измерения \bar{x} содержит в себе как случайную, так и остаточную систематическую погрешность. Поскольку случайная погрешность уменьшается с увеличением числа приемов измерений как $\frac{1}{\sqrt{n}}$, а остаточная систематическая погрешность в среднем не уменьшается, но остается постоянной и равной m_{δ} , целесообразно выполнять столько измерений, чтобы влиянием случайных ошибок на точность \bar{x} можно было пренебречь по сравнению с влиянием остаточных систематических ошибок, т. е. чтобы соблюдалось требование принципа пренебрегаемого влияния:

$$m_{\bar{x}} - m_{\delta} \leq \gamma m_{\bar{x}} \Rightarrow m_{\bar{x}}(1 - \gamma) \leq m_{\delta}, \quad (13)$$

где γ – малая, конкретно назначаемая величина (степень риска), обычно $\gamma = 0,05$.

На основании принципа пренебрегаемого влияния можно получить соотношение

$$m_{\Delta\bar{x}} \leq \frac{\sqrt{2\gamma}}{(1 - \gamma)} m_{\delta}, \quad (14)$$

или с учетом (13)

$$m_{\Delta_{\bar{x}}} \leq \sqrt{2\gamma} m_{\bar{x}}. \quad (15)$$

Таким образом, мы получили числовую характеристику случайной ошибки $\Delta_{\bar{x}}$, влиянием которой на точность \bar{x} можно пренебречь.

Так как

$$m_{\Delta_{\bar{x}}} = \frac{m_{\Delta}}{\sqrt{n}}, \quad (16)$$

то выражение (15) принимает вид

$$\frac{m_{\Delta}}{\sqrt{n}} \leq \sqrt{2\gamma} m_{\bar{x}}. \quad (17)$$

Отсюда следует минимальное число приемов n , обеспечивающее решение поставленной задачи,

$$n \geq \frac{m_{\Delta}^2}{2\gamma m_{\bar{x}}^2}. \quad (18)$$

Значение m_{Δ} оценивается на основании метрологических исследований. Требования к точности измерений элементов геодезических сетей $m_{\bar{x}}$ определяются в результате априорной оценки точности геодезического построения по вышеприведенной методике.

ОБОСНОВАНИЕ ДОПУСКОВ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ УГЛОВЫХ И ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В СПЕЦИАЛЬНЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СЕТЯХ

В процессе измерений линейно-угловых величин при создании специальных геодезических сетей должен осуществляться постоянный контроль точности. Для текущего предупредительного контроля назначаются допуски на размах варьирования результатов наблюдений R . Размах варьирования представляет собой разность между максимальным и минимальным результатами измерения:

$$R = x_{\max} - x_{\min}. \quad (19)$$

Значения $R_{ij} = x_i - x_j$, как функция результатов измерений, представляют нормальную случайную величину с параметром распределения

$$\sigma_R = \sqrt{2}m_{\Delta}. \quad (20)$$

На основании свойств нормального распределения получим с вероятностью 0,99 допустимую величину размаха варьирования результатов измерений:

$$R = 2,5\sqrt{2}m_{\Delta} = 3,5m_{\Delta}. \quad (21)$$

Допуск на размах варьирования позволяет контролировать величину случайных погрешностей, которые проявляются при многократных измерениях.

Для контроля истинных ошибок, которые обусловлены как случайными, так и постоянными (систематическими) факторами, устанавливаются допуски на невязки условий в геодезических сетях.

Невязка геометрического условия является истинной ошибкой функции. Ее допустимое значение можно получить из соотношения предельной и средней квадратических ошибок. С вероятностью 0,99 значения невязок по модулю не должны превосходить

$$|w| < 2,5m_w,$$

где m_w – среднее квадратическое значение невязки.

Следовательно, выражение

$$w_{\text{доп}} < 2,5m_w$$

будет определять величину допустимой невязки.

В линейно-угловой сети можно составить $r = n_p - 2p$ независимых условий, таких как в триангуляции, полигонометрии и трилатерации. Однако вследствие их разнообразия выбрать независимые условия бывает сложно.

Для выбора независимых условий будем исходить из того, что основным элементом линейно-угловой сети является треугольник, в котором измерены все углы и стороны (рис. 1). В таком треугольнике три элемента измерены избыточно, так как треугольник однозначно определяется по трем элементам, например по стороне и двум углам. Следовательно, угол и две стороны треугольника можно считать измеренными избыточно.

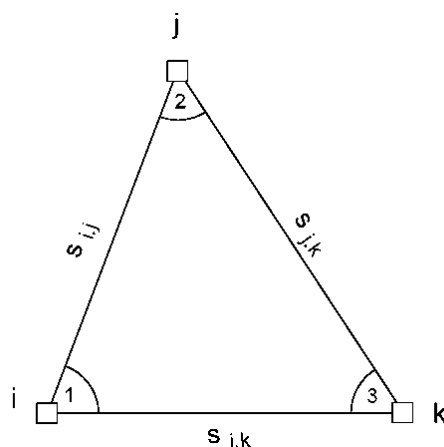


Рис. 1. Основной элемент линейно-угловой сети

Наиболее простыми независимыми математическими соотношениями между элементами треугольника являются условие фигуры и два условия сторон:

$$\beta'_1 + \beta'_2 + \beta'_3 - 180^\circ = 0;$$

$$d'_{i,j} \frac{\sin \beta'_1}{\sin \beta'_3} - d'_{j,k} = 0; \quad (22)$$

$$d'_{i,j} \frac{\sin \beta'_2}{\sin \beta'_3} - d'_{i,k} = 0.$$

Допустимые невязки условий в линейно-угловой геодезической сети вычисляются по формулам:

– для условия фигур

$$w_{\text{доп}} = 2,5m_\beta\sqrt{3} = 4,3m_\beta; \quad (23)$$

– для условия сторон

$$w_{\text{доп}} = 2,5 \sqrt{\left[\left(\frac{\rho''}{d_{i,j}} \right)^2 + \left(\frac{\rho''}{d_{i,k}} \right)^2 \right] m_a^2 + [\text{ctg}^2 \beta_i + \text{ctg}^2 \beta_k] m_\beta^2}. \quad (24)$$

УРАВНИВАНИЕ ЛИНЕЙНО-УГЛОВЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Линейно-угловые геодезические сети в целях исключения ошибок исходных данных уравниваются как свободные геодезические построения. В свободных геодезических сетях матрица коэффициентов параметрических уравнений имеет столбцовый дефект ранга d [3]. По этой причине система нормальных уравнений неизвестных становится вырожденной.

Использование псевдообратной матрицы N^+ , которая удовлетворяет условиям Пенроуза

$$NN^+N = N; \quad N^+NN^+ = N^+; \quad (NN^+)^T = NN^+; \quad (N^+N)^T = N^+N, \quad (25)$$

позволяет найти для системы уравнений поправок нормальное решение (решение с наименьшей нормой).

Псевдообратная матрица может быть вычислена по формуле [4]

$$N^+ = M_1 N_1 M_2, \quad (26)$$

где $M_1 = \begin{bmatrix} N_1^T \\ N_2^T \end{bmatrix} (N_1 N_1^T + N_2 N_2^T)^{-1}$; $M_2 = (N_1 N_1^T + N_3 N_3^T)^{-1} [N_1 \quad N_3^T]$; N_i ($i=1,2,3,4$) – соответствующие блоки матрицы $N = \begin{bmatrix} N_1 & N_2 \\ N_3 & N_4 \end{bmatrix}$.

Для симметрической матрицы

$$N^+ = M_1 N_1 M_1^T, \quad (27)$$

так как матрицы $N_2 = N_3^T$.

Матрица N разделяется на блоки таким образом, что N_1 – неособенная квадратная матрица, ранг которой равен рангу исходной матрицы N .

Отличительной чертой в алгоритме решения задачи уравнивания свободной геодезической сети, по сравнению с уравниванием несвободных сетей, будет являться замена обратной матрицы коэффициентов нормальных уравнений неизвестных псевдообратной матрицей N^+ , вычисляемой по правилам (27).

Для решения параметрических уравнений с использованием псевдообратной матрицы и оценки точности применяется следующая сводка формул:

$$\begin{aligned} \tau &= -(B^T P B)^+ B^T P l; \\ v &= P_B l; \\ P_B &= E - B (B^T P B)^+ B^T P; \\ P &= K_l^{-1}; \\ x_i &= x_{0i} + \xi_i; \\ y_i &= y_{0i} + \eta_i; \\ \mu &= \sqrt{\frac{v^T P v}{n - k}}; \\ Q_{xy} &= (B^T P B)^+; \\ Q_{M'd'} &= B (B^T P B)^+ B^T, \end{aligned} \quad (28)$$

где τ – вектор поправок к приближенным параметрам геодезической сети,

$$\tau = [\delta_{z_i} \quad \xi_i \quad \eta_i]^T (i=1, 2, \dots, 5);$$

B – матрица коэффициентов параметрических уравнений;

P – весовая матрица уравниваемых величин;

- K_l – ковариационная матрица ошибок уравниваемых величин;
 l – вектор свободных членов;
 v – вектор поправок к результатам измерений;
 x_{0i}, y_{0i} – приближенные значения координат пунктов сети;
 Q_{xy} – корреляционная матрица ошибок уравненных координат пунктов сети;
 $Q_{M'd'}$ – корреляционная матрица ошибок уравненных направлений и длин сторон сети.

Средняя квадратическая ошибка оцениваемых величин вычисляется по формуле

$$m_i = \mu\sqrt{Q_{ii}},$$

где Q_{ii} – диагональные элементы корреляционной матрицы ошибок оцениваемых величин.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ ОБОСНОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ К ИЗМЕРЕНИЯМ

Рассмотренная методика была использована для обоснования точности измерений и допусков при проектировании эталонной геодезической сети «Звёздочка» на полигоне «Лехтуси» ВКА имени А.Ф. Можайского.

Исходными данными для проектирования послужили средняя квадратическая погрешность положения пункта эталонной геодезической сети $m_{x',y'} = 1$ мм и среднее расстояние между пунктами сети $d = 400$ м.

Схема эталонной геодезической сети представляет собой геодезическое построение из пяти пунктов, в котором измеряются направления и длины сторон между всеми пунктами сети. В такой сети положение каждого пункта определяется по линейно-угловым измерениям с четырех окружающих пунктов и трем углам на определяемом пункте.

По формуле (4) находим число всех измеренных величин для определения координат пункта:

$$n = 3n' - 1 = 3 \times 4 - 1 = 11.$$

Используя формулу (3), устанавливаем необходимую точность разового определения положения пункта сети по линейно-угловым измерениям:

$$m_{x,y} = m_{x',y'} \sqrt{\frac{n}{k}} = 1 \text{ мм} \sqrt{\frac{11}{2}} = 2,3 \text{ мм}.$$

Допустимые продольная и поперечная погрешности разового определения положения пункта в самом слабом месте сети не должны превосходить

$$m_L = m_Q = \frac{m_{x,y}}{\sqrt{2}} = \frac{2,3 \text{ мм}}{\sqrt{2}} = 1,6 \text{ мм}.$$

Выражения (6) и (8) определяют необходимую точность линейно-угловых измерений в эталонной геодезической сети:

$$m_d = m_L = 1,6 \text{ мм}; m_\alpha = \frac{\rho m_Q}{d} = \frac{206265'' \cdot 1,6 \text{ мм}}{400000 \text{ мм}} = 0,83''.$$

Число приемов угловых и линейных измерений рассчитывается по формуле (18). При использовании электронного тахеометра с характеристиками $m_{\Delta\alpha} = 1''$ и $m_{\Delta d} = 1$ мм будем иметь

$$n_\alpha \geq \frac{m_{\Delta\alpha}^2}{2\varepsilon m_\alpha^2} = \frac{1^2}{2 \cdot 0,05 \cdot 0,84^2} = 14$$

приемов для измерения направлений и

$$n_d \geq \frac{m_{\Delta_d}^2}{2\varepsilon m_d^2} = \frac{1^2}{2 \cdot 0,05 \cdot 1,6^2} = 4$$

приема для измерения длин сторон.

Допустимую величину размаха варьирования результатов многократных измерений углов и длин сторон получим по формуле (21):

$$R_\beta = R_\alpha \sqrt{2} = 5,0 m_{\Delta_\alpha} = 5,0 \times 1'' = 5,0'';$$

$$R_d = 2,5 \sqrt{2} m_{\Delta_d} = 3,5 m_{\Delta_d} = 3,5 \times 1 \text{ мм} = 3,5 \text{ мм}.$$

Допустимые невязки условий в линейно-угловой геодезической сети с углами треугольников 30–120° вычисляются:

– для условия фигур по формуле (23)

$$w_{\text{доп}} = 2,5 m_\alpha \sqrt{6} = 6,1 m_\alpha = 6,1 \times 0,83'' = 5,1'';$$

– для условия сторон по формуле (24)

$$w_{\text{доп}} = 2,5 \sqrt{\left[\left(\frac{\rho''}{d_{i,j}} \right)^2 + \left(\frac{\rho''}{d_{i,k}} \right)^2 \right] m_d^2 + 2 [\text{ctg}^2 \beta_i + \text{ctg}^2 \beta_k] m_\alpha^2} =$$

$$= 2,5 \sqrt{[(0,5)^2 + (0,5)^2](1,6)^2 + [(1,73)^2 + (-0,58)^2](0,84)^2} =$$

$$= 2,5 \sqrt{1,28 + 4,70} = 6,1''.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренная в статье методика обоснования технических требований к измерениям позволяет по требуемой точности положения пунктов выполнять все необходимые расчеты при проектировании специальных геодезических сетей.

Предлагаемая методика может быть востребована и для обоснования технических указаний при создании разбивочных геодезических сетей на площадках строительства уникальных объектов, таких как космодромы, АЭС, вантовые мосты, тоннели и др.

Список используемых источников

1. Астапович А. В. Теория математической обработки геодезических измерений: учеб. пособие. – СПбВТКУ, 1997. – Ч. 1: Основы теории ошибок измерений. – 199 с.
2. Большаков В. Д., Гайдаев П. А. Теория математической обработки геодезических измерений. – М.: Недра, 1977. – 367 с.
3. Маркузе Ю. И. Алгоритмы для уравнивания геодезических сетей на ЭВМ. – М.: Недра, 1989. – 248 с.
4. Машимов М. М. Методы математической обработки астрономо-геодезических измерений: учебник. – М.: ВИА, 1990. – 510 с.

К. К. Жбанов

МОДЕЛЬ ПОЛУЧЕНИЯ НОРМАЛЬНЫХ ВЫСОТ РЕЛЬЕФА ПО РАЗНОРОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Предложена модель получения нормальных высот рельефа на недоступные территории с использованием средств дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) космического базирования, наземной топогеодезической информации и данных об аномальности гравитационного поля Земли. Сформулированы подходы к получению, анализу и обработке исходных геодезических данных на недоступные территории. Описаны структурно-функциональные блоки предлагаемой модели.

Главной особенностью модели является совместное использование геодезических данных в виде цифровых моделей рельефа (ЦМР), полученных методами ДЗЗ различной физической природы (оптическая стереоскопическая и радиолокационная интерферометрическая съемки).

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, цифровая модель рельефа, нормальная высота, оптическая стереосъемка, радиолокационная интерферометрия, метод наименьших квадратов, совместная обработка разнородных данных ДЗЗ.

ВВЕДЕНИЕ

Определение высот точек физической поверхности Земли в труднодоступных и недоступных районах необходимо для решения задач картографирования планеты и повышения качества топогеодезического обеспечения систем оружия. Одним из наиболее рациональных путей определения высоты на недоступной территории является использование ЦМР, полученных по съемочным данным космических комплексов. Точность таких моделей составляет 4–7 м в зависимости от степени пересеченности местности [1]. Для решения некоторых задач (например, создания топографических карт масштабом 1:25000 и крупнее) указанная точность является недостаточной. Поэтому повышение точности ЦМР, получаемых методами космической съемки, является актуальной на сегодняшний день задачей.

Модели рельефа могут создаваться на основе совместной обработки данных оптической стереосъемки и радиолокационной интерферометрии. Однако методов решения этой задачи с точностью 3–5 м не разработано. В данной статье предлагается новый подход к решению задачи оперативного создания ЦМР требуемой точности путем совместной обработки разнородной исходной информации.

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПОЛУЧЕНИЯ НОРМАЛЬНЫХ ВЫСОТ РЕЛЬЕФА ПО РАЗНОРОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Высотные данные на недоступную территорию необходимо создавать в виде цифровых моделей рельефа (ЦМР) в системе нормальных высот. Получение нормальных высот рельефа по данным ДЗЗ начинается с определения района создания ЦМР. Границы прямоугольной области района создания ЦМР R задаются координатами юго-западного угла (x_{103}, y_{103}) и протяженностью района с севера на юг L_x и с запада на восток L_y :

$$R = \langle x_{103}, y_{103}, L_x, L_y \rangle.$$

ЦМР DEM представим в виде матрицы размерностью $m \times n$, которая состоит из регулярно расположенных с дискретностью Δ элементов a_{ij} , заданных значениями нормальных высот H^i и плоских прямоугольных координат x_i, y_j , т. е.

$$DEM = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix}, \begin{cases} m = \frac{L_x}{\Delta}, n = \frac{L_y}{\Delta} \\ a_{ij} = H^y(x_i, y_j) \\ x_i = x_{ЮЗ} + i\Delta \\ y_j = y_{ЮЗ} + j\Delta \end{cases} \quad (1)$$

Наиболее адекватным методом определения высот рельефа на недоступной территории является дистанционное зондирование Земли, выполняемое средствами космического базирования. Процесс получения нормальных высот рельефа по данным ДЗЗ показан на рис. 1.

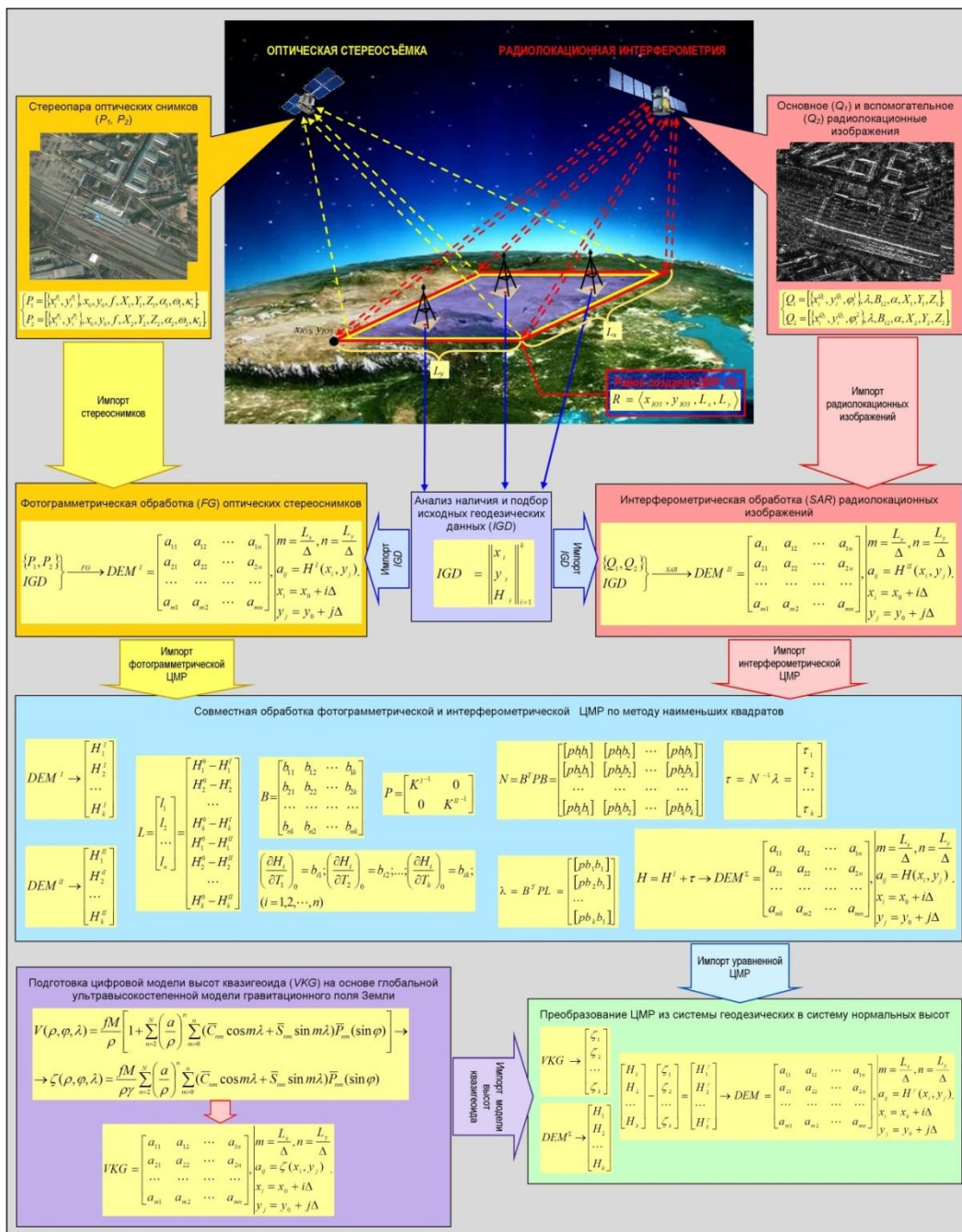


Рис. 1. Модель получения нормальных высот рельефа по разнородной информации космических комплексов

Необходимую исходную информацию возможно получить по данным оптической стереосъемки и радиолокационной интерферометрической съемки. Их совместное применение для решения целевой задачи предполагает реализацию двух блоков получения и обработки информации.

1. Блок подготовки исходной геодезической информации и съемочных материалов. К исходной геодезической информации следует относить цифровые модели высот квазигеоида (аномалий высот) и пункты исходной основы, имеющиеся на район создания ЦМР. Модель аномалий высот необходима для преобразования ЦМР в систему нормальных высот, а также для приведения опорных пунктов в систему геодезических высот. Цифровую модель высот квазигеоида VKG , аналогично ЦМР, представим в виде матрицы (1), элементы которой заданы значениями высот квазигеоида ζ :

$$VKG = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix}, \begin{cases} m = \frac{L_x}{\Delta}, n = \frac{L_y}{\Delta} \\ a_{ij} = \zeta(x_i, y_j) \\ x_i = x_{ю3} + i\Delta \\ y_j = y_{ю3} + j\Delta \end{cases} .$$

Модель высот квазигеоида должна наилучшим образом описывать структуру гравитационного поля Земли на картографируемую территорию.

Обязательным условием как для высокоточной фотограмметрической обработки оптических стереоснимков, так и для высокоточной интерферометрической обработки радиолокационных снимков является наличие исходных геодезических пунктов. Исходные пункты на недоступной территории могут быть представлены в различных системах и типах высот. Важным моментом, возникающим на стыках геодезии и фотограмметрии, является использование именно геодезических высот при последующей обработке снимков. На район создания ЦМР имеется k исходных пунктов IGD . Для обработки космических снимков пункты должны быть представлены в системе плоских прямоугольных координат СК-42 (x_i, y_i) и в системе геодезических высот (H_i) над эллипсоидом Красовского

$$IGD = \left\| \begin{matrix} x_i \\ y_i \\ H_i \end{matrix} \right\|_{i=1}^k .$$

Для оптической стереосъемки количество опорных пунктов должно быть не менее пяти, а располагаться они должны по схеме «конверта», т. е. один пункт в центре и по одному пункту в каждом углу стереопостроения [2]. Для радиолокационной интерферометрии количество опорных пунктов должно составлять 1–3 на интерферометрическое построение [3].

Главная особенность исходных пунктов на недоступной территории заключается в их ограниченном количестве. Основными источниками получения информации об исходных геодезических данных на недоступных территориях являются (для каждого источника в скобках указаны наиболее типичные системы координат и высот, а также тип координат):

- каталоги геодезических пунктов (система координат – СК-42, система высот – Балтийская 1977 года, тип координат – плоские прямоугольные);
- координаты пунктов космической геодезической сети и/или спутниковых референционных станций (системы координат – ПЗ-90.11, WGS-84, ITRF, системы высот – геодезические, тип координат – геоцентрические);
- топографические карты – высота пункта подписана на карте, а его координаты определяются путем дешифрирования пункта на ортотрансформированном космическом снимке высокого разрешения (система и тип координат выбираются в программе визуализации ортофотоплана, система высот – нормальная или ортометрическая);

– данные спутниковой альтиметрии внутренних водоемов – высота соответствует линии уреза воды, координаты выбранной контурной точки на береговой линии водоема определяются по ортотрансформированному космическому снимку высокого разрешения (система и тип координат выбираются в программе визуализации ортофотоплана, система высот – нормальная или ортометрическая).

Понятно, что информация об исходных пунктах (и тем более в требуемых количествах) доступна не на все районы земного шара. Для решения этой проблемы в нашей стране была создана континентальная планово-высотная основа (КПВО). КПВО представляет собой каркасные сети фототриангуляции, развитые в пределах всех континентов, по данным снимков космического картографического комплекса «Комета». При этом КПВО обеспечивает вынос глобальной геоцентрической системы координат в натуру.

В табл. 1 представлена обобщенная информация по источникам данных об исходных пунктах на недоступную территорию.

Таблица 1

**Основные источники данных об исходных пунктах
на недоступную территорию**

№ п/п	Источник данных	Точность, м		Координаты		Высота	
		В плане	По высоте	Система	Тип	Система	Тип
1	Каталоги координат	≤0,1	≤0,3	СК-42	Плоская прямоугольная	БСВ-77	Нормальная
2	Пункты КГС, СРС	≤0,05	≤0,07	ПЗ-90.11, WGS-84, ITRF	Геоцентрическая	ПЗ-90.11, WGS-84, ITRF	Геодезическая
3	Топографические карты	≤5	0,3-0,5	Любая	Любой	Страны-составителя карты	нормальная или ортометрич.
4	Спутниковая альтиметрия внутренних водоёмов	≤5	0,25	Любая	Любой	Страны-владельца геопортала	Нормальная или ортометрич.
5	КПВО	≤6	≤5	ПЗ-90.11	Геоцентрическая	ПЗ-90.11	Геодезическая

Приоритетность использования источников исходных пунктов соответствует порядку их перечисления, но на любую территорию суши исходные данные могут быть набраны в достаточном количестве. Преобразование геодезических данных из системы координат и высот источника в систему координат СК-42 осуществляется в соответствии с работой [4].

К съёмочным материалам относятся космические снимки картографируемой территории. К пассивным методам съёмки относится оптическая стереосъёмка, в процессе которой получают стереопары космических снимков (P_1, P_2) с набором данных об их пространственном положении

$$\begin{cases} P_1 = \left[\{x_i^{P_1}, y_i^{P_1}\}, x_0, y_0, f, X_1, Y_1, Z_1, \alpha_1, \omega_1, \kappa_1 \right], \\ P_2 = \left[\{x_i^{P_2}, y_i^{P_2}\}, x_0, y_0, f, X_2, Y_2, Z_2, \alpha_2, \omega_2, \kappa_2 \right], \end{cases}$$

где $\{x_i^{P_1}, y_i^{P_1}\}, \{x_i^{P_2}, y_i^{P_2}\}$ – координаты точек снимков;
 x_0, y_0, f – элементы внутреннего ориентирования снимков;
 $X_1, Y_1, Z_1, X_2, Y_2, Z_2$ – линейные элементы внешнего ориентирования стереопары;
 $\alpha_1, \omega_1, \kappa_1, \alpha_2, \omega_2, \kappa_2$ – угловые элементы внешнего ориентирования стереопары.

К активным методам съемки относится радиолокационная интерферометрическая съемка, в процессе которой получают основные (Q_1) и вспомогательные (Q_2) радиолокационные изображения с набором данных об их пространственном положении

$$\begin{cases} Q_1 = [\{x_i^{Q_1}, y_i^{Q_1}, \varphi_i^1\}, \lambda, B_{12}, \alpha, X_1, Y_1, Z_1], \\ Q_2 = [\{x_i^{Q_2}, y_i^{Q_2}, \varphi_i^2\}, \lambda, B_{12}, \alpha, X_2, Y_2, Z_2], \end{cases}$$

где $\{x_i^{Q_1}, y_i^{Q_1}, \varphi_i^1\}, \{x_i^{Q_2}, y_i^{Q_2}, \varphi_i^2\}$ – координаты точек снимков и измеренные значения интерферометрической фазы в этих точках;
 λ – длина волны радиолокатора;
 B_{12} – база интерферометра;
 α – угол между базой и горизонтальной плоскостью;

$X_1, Y_1, Z_1, X_2, Y_2, Z_2$ – пространственные координаты точек съемки основного и вспомогательного радиолокационных изображений.

При выполнении космической оптико-электронной стереосъемки или радиолокационной интерферометрической съемки на район построения ЦМР речь, как правило, идет не про одиночную пару снимков, а про съёмочный маршрут (оптическая стереосъемка) или интерферометрическую цепочку (радиолокационная интерферометрия), которые имеют продольное перекрытие не менее 60%. Продольные съёмочные маршруты объединяются в блоки с поперечным перекрытием не менее 30% [2].

После подготовки исходной геодезической информации и съёмочных материалов на район создания ЦМР становится возможным выполнить обработку космических снимков для построения ЦМР. Данный процесс представлен в следующем блоке.

2. Блок совместной обработки данных. Он предназначен для создания ЦМР в системе нормальных высот по результатам уравнивания моделей рельефа, полученных методами оптической стереосъемки и радиолокационной интерферометрии. В данном блоке сначала выполняется раздельная фотограмметрическая и интерферометрическая обработка соответствующих типов снимков. В результате получаются фотограмметрическая и интерферометрическая ЦМР в системе геодезических высот с одинаковыми координатами узловых точек, но с различными значениями высот. После этого обе модели обрабатываются совместно по методу наименьших квадратов, и получается уравненная ЦМР в системе геодезических высот. В заключение ЦМР преобразуется в систему нормальных высот.

Наиболее совершенные отечественные программные продукты для обработки космических снимков разработаны компанией Ракурс – «PHOTOMOD ЦФС» для фотограмметрической обработки и «PHOTOMOD Radar» для интерферометрической обработки. Поэтому обработку снимков предлагается осуществлять в этих программных продуктах.

Заключительным этапом и в фотограмметрической, и в интерферометрической обработке является интерполирование высот нерегулярно расположенных точек в узлы регулярной сетки. Несмотря на то, что данная операция реализована в программных продуктах, процесс интерполяции необходимо рассмотреть отдельно, вследствие некоторого снижения точности регуляризованного поля рельефа относительно исходного поля хаотичных пикетов. Значит,

при дальнейшей разработке метода построения ЦМР необходимо исследовать возможные алгоритмы интерполяции и выбрать наиболее оптимальный из них.

Обобщенно процесс обработки космических снимков для получения высот рельефа в регулярном виде можно представить как совместную обработку информации об опорных пунктах, самих снимков и данных об их пространственном положении. Для фотограмметрической (FG) и интерферометрической (SAR) обработки данный процесс имеет вид:

$$\left. \begin{matrix} (P_1, P_2) \\ IGD \end{matrix} \right\} \xrightarrow{FG} DEM^I = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix}, \begin{cases} m = \frac{L_x}{\Delta}, n = \frac{L_y}{\Delta} \\ a_{ij} = H^I(x_i, y_j), \\ x_i = x_{ЮЗ} + i\Delta \\ y_j = y_{ЮЗ} + j\Delta \end{cases}$$

$$\left. \begin{matrix} (Q_1, Q_2) \\ IGD \end{matrix} \right\} \xrightarrow{SAR} DEM^{II} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix}, \begin{cases} m = \frac{L_x}{\Delta}, n = \frac{L_y}{\Delta} \\ a_{ij} = H^{II}(x_i, y_j), \\ x_i = x_{ЮЗ} + i\Delta \\ y_j = y_{ЮЗ} + j\Delta \end{cases}$$

Результатом обработки оптических стереопар и радиолокационных изображений являются две цифровые модели рельефа (фотограмметрическая – DEM^I и интерферометрическая – DEM^{II}) в системе геодезических высот одинаковой дискретности и с идентичными координатами узловых точек. Понятно, что значения высот (H^I и H^{II} соответственно) в идентичных точках у двух ЦМР в общем случае будут различными.

В основе алгоритмов обработки оптико-электронной и радиолокационной съемочной информации лежит реализация метода наименьших квадратов, и в том и в другом случае в числе определяемых параметров будут находиться координаты и высоты пикетных точек. Поэтому результатом оценки точности фотограмметрической и интерферометрической обработки являются ковариационные матрицы K^I и K^{II} ошибок m_i пространственного положения пикетов

$$K^I = \begin{bmatrix} m_1^I & & & \\ & m_2^I & & \\ & & \dots & \\ & & & m_i^I \end{bmatrix}, K^{II} = \begin{bmatrix} m_1^{II} & & & \\ & m_2^{II} & & \\ & & \dots & \\ & & & m_i^{II} \end{bmatrix}.$$

Таким образом, в результате отдельной обработки данных оптической стереосъемки и радиолокационной интерферометрии дважды получаются значения высот одних и тех же точек рельефа, для которых выполнена оценка точности. Вследствие этого возникает неоднозначность искомых величин. Последнее приводит к необходимости уравнивания высот таких точек.

Уравнивание высот предлагается выполнять по методу наименьших квадратов. В качестве определяемых параметров принимаются геодезические высоты точек местности H , число которых равняется k . Уравниваемыми величинами будут являться высоты одноименных точек, определенных методами оптической стереосъемки и радиолокационной интерферометрии. Веса уравниваемых величин следует назначить в соответствии с ковариационными матрицами ошибок высот пикетов.

В результате уравнивания получается ЦМР DEM^Σ , дискретность и координаты узловых точек которой идентичны исходным ЦМР (DEM^I и DEM^{II})

$$DEM^{\Sigma} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix}, \begin{cases} m = \frac{L_x}{\Delta}, n = \frac{L_y}{\Delta} \\ a_{ij} = H(x_i, y_j) \\ x_i = x_{i03} + i\Delta \\ y_j = y_{j03} + j\Delta \end{cases}$$

Заключительным этапом является преобразование ЦМР DEM^{Σ} , уравненной в системе геодезических высот H , в ЦМР DEM в системе нормальных высот H^{γ} , путем удаления аномальной части высоты ζ

$$H^{\gamma} = H - \zeta.$$

Данная операция реализуется в программном продукте «ГИС Панорама» путем вычитания матрицы высот квазигеоида VKG из матрицы высот DEM^{Σ} :

$$\begin{array}{l} VKG \rightarrow \begin{bmatrix} \zeta_1 \\ \zeta_2 \\ \cdots \\ \zeta_k \end{bmatrix} \\ DEM^{\Sigma} \rightarrow \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ \cdots \\ H_k \end{bmatrix} \end{array} \rightarrow \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ \cdots \\ H_k \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \zeta_1 \\ \zeta_2 \\ \cdots \\ \zeta_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_1^{\gamma} \\ H_2^{\gamma} \\ \cdots \\ H_k^{\gamma} \end{bmatrix} \rightarrow DEM = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix}, \begin{cases} m = \frac{L_x}{\Delta}, n = \frac{L_y}{\Delta} \\ a_{ij} = H^{\gamma}(x_i, y_j) \\ x_i = x_{i03} + i\Delta \\ y_j = y_{j03} + j\Delta \end{cases}$$

В результате получается уравненная ЦМР в системе нормальных высот с дискретностью узловых точек Δ . В ходе разработки метода построения ЦМР необходимо обосновать требуемую дискретность создания модели.

Проблема выбора необходимой детальности ЦМР сводится к нахождению способа, который позволял бы при минимальном количестве точек модели максимально информативно и с требуемой точностью отображать исходную поверхность.

Очевидно, что детальность расположения узловых точек зависит от типа и характера рельефа района. Необходимо изучить имеющиеся подходы, позволяющие вычислять максимальное допустимое расстояние между двумя соседними узловыми точками Δ , в зависимости от степени пересеченности моделируемой поверхности.

Модель получения нормальных высот рельефа по данным ДЗЗ предназначена для реализации на недоступной территории. Это означает, что возможность непосредственной проверки точностных характеристик получаемой ЦМР будет или затруднена, или невозможна. С другой стороны, характеристики космической съемки (координаты центров снимков, элементы их ориентирования, высота зондирования, параметры орбит КА и т. д.) для всех возможных условий поддаются прогнозированию. Поэтому условия, характерные для недоступных территорий, необходимо воспроизводить на территории, доступной для выполнения альтернативных видов съемок (наземной или воздушной). То есть верификация предлагаемой модели должна выполняться на тестовых участках, которые соответствуют различным формам рельефа и типам подстилающей поверхности.

На тестовых участках определяется альтернативными методами и с более высокой точностью пространственное положение эталонных точек, относительно которых оценивается точность ЦМР, создаваемых в соответствии с предложенной моделью. Понятно, что ЦМР на тестовый участок и ЦМР на недоступную территорию должны создаваться с использованием

идентичных материалов ДЗЗ, количество опорных пунктов должно быть одинаковым, а их точность – сопоставима.

Точность ЦМР m_H на тестовом участке должна оцениваться по формуле вычисления СКО

$$m_H = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_{DEM}^{\gamma} - H_{REF}^{\gamma})^2}{n}},$$

где H_{DEM}^{γ} – нормальная высота точки, полученная по ЦМР;
 H_{REF}^{γ} – нормальная высота эталонной точки;
 n – количество точек.

Если ЦМР на тестовый участок соответствует предъявляемым требованиям точности, то принимается решение о пригодности использования данных съемочных материалов для создания ЦМР на недоступной территории. В случае, если точность ЦМР на тестовом участке будет недостаточной, то необходимо создать ЦМР заново, с использованием более качественных исходных материалов, относящихся к блоку 1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана модель получения нормальных высот рельефа на недоступные территории, применение которой обеспечит определение нормальных высот с точностью 3–5 м в зависимости от сложности рельефа картографируемой территории.

Для использования предлагаемой модели необходимо знать район создания ЦМР. Другим существенным условием является одновременное наличие данных оптической стереосъемки и радиолокационной интерферометрической съемки на заданный район. Вследствие широкого развития средств дистанционного зондирования Земли космического базирования и перманентного наполнения банка данных съемочной информацией выполнение последнего условия не вызывает затруднений.

Отличительные особенности модели заключаются в следующем:

– в предложении использовать в качестве исходных пунктов:

1) геодезические пункты с зарубежных топографических карт,

2) высоты уреза воды по данным спутниковой альтиметрии внутренних водоемов, при этом координаты таких пунктов должны уточняться по ортофотопланам высокого разрешения;

– в совместной обработке информации о высоте рельефа, полученной методами оптической стереосъемки и радиолокационной интерферометрической съемки, т. е. съемочных данных различной физической природы (пассивный и активный методы ДЗЗ).

Основу модели составляет совместная обработка двух разнородных массивов дискретных значений высот рельефа одной и той же территории с использованием математического аппарата метода наименьших квадратов.

Массивы данных в виде ЦМР получают из фотограмметрической и интерферометрической обработки соответствующих типов снимков. Применение двух видов измерений несколько повышает точность конечных результатов и, что не менее важно, существенно повышает достоверность геодезических данных на недоступную территорию, вследствие дополнительного привлечения альтернативной съемочной информации.

Предложенная модель может стать «фундаментом» для разработки метода построения ЦМР на основе нейтрализации погрешностей матриц высот, полученных по данным оптической стереосъемки и радиолокационной интерферометрии, а также информации об ондуляциях аномалии высоты.

Список используемых источников

1. Яковлев А. И., Жбанов К. К. Основные направления совершенствования глобальных цифровых моделей рельефа // Молодежь. Техника. Космос: труды двенадцатой общерос. молодежн. научн.-техн. конф. БГТУ – 2020. – Т. 3. – С. 189–197.
2. Инструкция по фотограмметрическим работам при создании топографических карт и планов (ГКИНП (ГНТА)-02-036-02). – М.: ЦНИИГАиК, 2002. – 48 с.
3. Сосновский А. В. Интерферометрическая обработка данных космических радиолокаторов с синтезированной апертурой при создании цифровых моделей рельефа земной поверхности: состояние и проблемы // Ural Radio Engineering Journal. – 2020. – № 4(2). – С. 198–233.
4. ГОСТ 32453-2017. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек. – М.: Стандартинформ, 2017. – 24 с.

И. Д. Канарский,
кандидат географических наук;
Н. А. Козлова,
кандидат географических наук;
О. А. Королёва;
А. С. Подчасский

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ ОПАСНЫХ ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ И ЯВЛЕНИЙ

Возрастающее количество и интенсивность опасных природных процессов и явлений, а также отсутствие надежной прогностической базы требуют решения вопроса о необходимости их оперативного мониторинга и контроля в интересах обеспечения безопасности территории РФ в геофизическом отношении.

В статье рассматривается проблема разработки современных средств контроля опасных природных процессов и явлений. Предложен путь решения обозначенной проблемы путем создания автоматизированного комплекса мониторинга опасных природных процессов и явлений, описаны существующие разработки и сформулированы основные направления дальнейших исследований по данной теме.

Ключевые слова: автоматизированная экспертная система, опасные природные процессы и явления, оперативный мониторинг, контроль, геофизическая информация, база данных, обработка информации, метод Шортлифа – Бьюкенена.

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение геофизической безопасности страны во многом базируется на ведении оперативного мониторинга и контроля опасных природных процессов и явлений (ОППЯ).

К опасным природным процессам и явлениям относятся [1]:

- 1) в литосфере – извержения вулканов, землетрясения, горные обвалы, оползни, сели, снежные лавины, пожары, таяние вечной мерзлоты;
- 2) в гидросфере – вариации уровня Мирового океана, волны цунами, наводнения, паводки, переувлажнение почв, становление и сход снежного покрова, речного, морского льда и т. д.;
- 3) в атмосфере – тропические и активные внетропические циклоны, тайфуны, грозовые фронты, продолжительные осадки, ливни, обширные зоны туманов, засуха в регионах, снежные бури, заносы, обледенение летательных аппаратов и наземной инфраструктуры хозяйственного и военного назначения;
- 4) в околоземном космическом пространстве (ОКП) – магнитосферно-ионосферные возмущения, магнитные бури, изменения радиационной обстановки, метеорные потоки.

Вследствие больших пространственных масштабов и энергopotенциала многих из перечисленных ОППЯ, внезапности и скорости проявления их неблагоприятных или разрушительных свойств, с одной стороны, и из-за отсутствия надежных методов их диагностики и прогнозирования, с другой стороны, возникает необходимость в выполнении задачи по оперативному контролю (постоянное слежение, мониторинг) за развитием таких процессов и явлений. В результате данная задача на сегодняшний день стала одной из наиболее актуальных задач, решаемых в интересах обеспечения геофизической безопасности страны.

В условиях отсутствия надежной теоретической базы основной задачей оперативного контроля ОППЯ являются постоянное слежение за геофизическими (гидрометеорологическими) условиями [ГФУ (ГМУ)], благоприятными для формирования и развития ОППЯ; отслеживание процесса, стадий их развития, текущей опасности и пространственно-временной локализации этих условий. Отчасти функции контроля ОППЯ выполняют существующие

федеральные и ведомственные системы предупреждения и оповещения об опасных природных процессах и явлениях. Проблемами при решении задач подобного контроля являются:

– отсутствие или недостаточность прогностической базы многих ОППЯ, являющихся, как правило, процессами многофакторными, со сложными причинно-следственными связями. Такие процессы часто относят к классу «зашумленных»;

– неудовлетворительность качества исходной геофизической (гидрометеорологической) информации (ГФИ, ГМИ): недостаточные состав, точность, репрезентативность, пространственно-временное разрешение, периодичность, оперативность;

– необходимость обработки в оперативном режиме огромного объема разнообразной ГФИ: фактической (оперативной), прогностической, климатологической, архивной, служебной. Только одна данная проблема еще 5–10 лет назад при имеющихся мощностях вычислительной и коммуникационной техники определяла задачу по реализации контроля ОППЯ в подобной постановке как нерешаемую.

В настоящее время с точки зрения возросших мощностей вычислительной техники, развития и совершенствования геоинформационных систем постановка задачи по оперативному мониторингу ОППЯ уже не кажется нереальной. Что же касается развития теоретической базы многих геофизических (гидрометеорологических) процессов (ГФП, ГМП); увеличения объема, состава и повышения качества исходной информации, то здесь, в силу различных объективных и субъективных причин, особого прогресса не наблюдается.

В указанных выше условиях задачу по оперативному контролю ОППЯ приходится относить к разряду задач по диагностированию нечетких («зашумленных») процессов [2–4]. Такие задачи встречаются во многих областях знаний (медицина, геология, биология, агрометеорология, геофизика, военное дело). Решаются они на основе комплексного анализа, как правило, неточной, нечеткой и даже косвенной информации с использованием методов нечеткой, многозначной, байесовской логик или любых других подобных схем.

Как известно, сутью такого анализа исходной информации является оценивание степени истинности утверждений (версий, гипотез) о состоянии, особенностях, пространственно-временной локализации и перспективах развития диагностируемого процесса. Исходной информацией для анализа являются значения специальных показателей, отражающих состояние и характер развития процесса (явления).

Текущие значения показателей определяются на основе имеющихся теоретических знаний, фактической исходной информации, прогностической, режимной (климатической), архивной информации, экспериментальных данных и с опорой на знания, опыт и интуицию соответствующих экспертов. Анализ результатов обработки этих значений показателей позволяет по полученным оценкам истинности экспертируемых утверждений (гипотез, версий) достаточно обоснованно выбрать наиболее достоверную из анализируемых или, по крайней мере, отбросить заведомо неверную. Этот выбор может служить фундаментом для разработки соответствующих рекомендаций с целью принятия управляющих решений.

Разработка механизма решения задач подобного типа с учетом необходимости обработки большого объема исходной информации, ведения многочисленных расчетов и привлечения экспертных оценок приводит к созданию автоматизированных экспертных систем (АЭС) по диагностированию каких-либо процессов. Аналогами таких систем являются автоматизированные экспертные системы (комплексы) по поддержке принятия решений (АЭС ППР) [4, 5].

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ОПЕРАТИВНОГО МОНИТОРИНГА И КОНТРОЛЯ ОПАСНЫХ ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ И ЯВЛЕНИЙ

Разработку системы оперативного мониторинга и контроля опасных природных процессов и явлений, как следует из вышеизложенного, целесообразно вести по двум направлени-

ям, связанным с созданием подсистем: подсистемы информационного обеспечения и подсистемы обработки информации. Структурная схема предлагаемой системы оперативного контроля ОППЯ представлена на рис. 1.

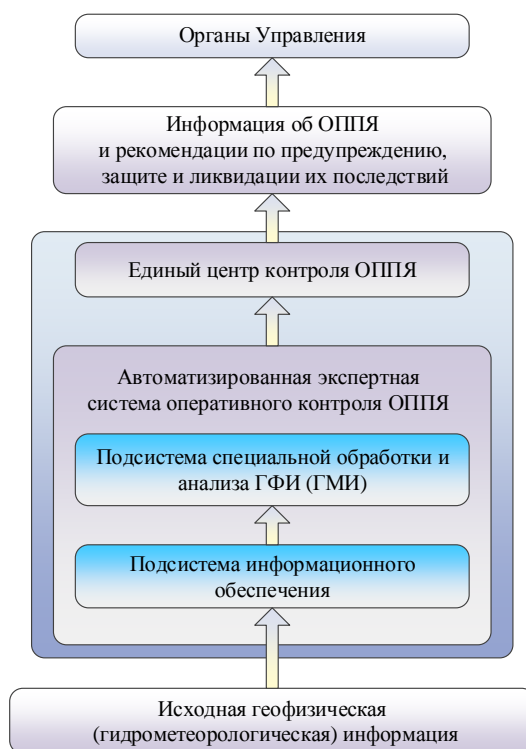


Рис. 1. Структурная схема предлагаемой системы оперативного контроля ОППЯ

Организация полнофункциональной подсистемы информационного обеспечения позволит выполнять функции сбора, обобщения, анализа, систематизации и накопления разнородной информации, получаемой из всех доступных источников (международных, национальных, региональных, ведомственных специализированных систем наблюдений и обработки информации) и поступающей в разное время, в различных масштабах и форматах данных, с разной детализацией и достоверностью.

Структурная схема подсистемы информационного обеспечения представлена на рис. 2. В соответствии с представленной схемой (рис. 2) поступающая ГФИ после сортировки, раскодирования и преобразования во внутренний формат системы архивируется, и на ее основе формируются опорные базы данных (БД) результатов наблюдений.

Опорные БД используются для расчета значений специализированных показателей (идентификаторов) диагностируемых характеристик ОППЯ. Для каждого ОППЯ и диагностируемой характеристики создается свой состав специализированных показателей, отражающих наличие благоприятных для формирования данного ОППЯ ГФУ, состояние, динамику их развития, степень опасности текущего этапа экспертируемого процесса и т. д.

В процессе расчета значений показателей может использоваться любая доступная ГФИ, имеющая отношение к данному типу ОППЯ: текущая, прогностическая, штормовая, климатическая, архивная, регулярная и эпизодическая. Расчет значений показателей базируется на имеющихся теоретической базе по данному ОППЯ, физико-статистических, экспериментальных и экспертных оценках причинно-следственных связей. Качество расчета показателей напрямую зависит от информационной насыщенности сформированных БД.

Вторая подсистема – автоматизированная и унифицированная подсистема специальной обработки и анализа ГФИ (рис. 3).

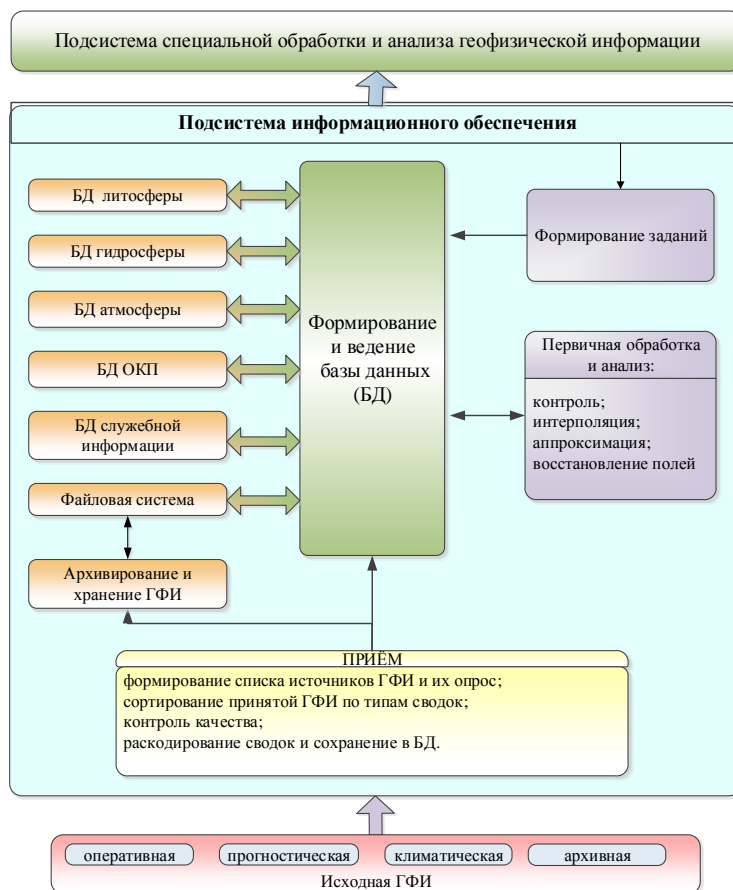


Рис. 2. Структурная схема подсистемы информационного обеспечения

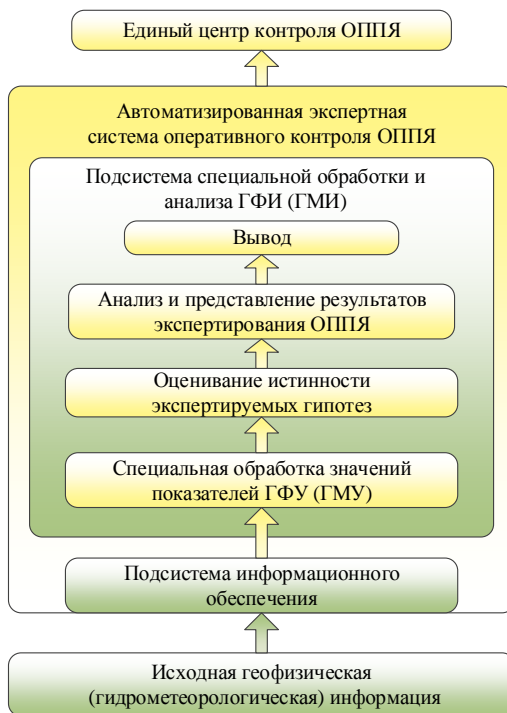


Рис. 3. Структурная схема подсистемы специальной обработки и анализа ГФИ

Данная подсистема предназначена для идентификации явления, районов с благоприятными ГФУ для его развития, стадии развития, степени опасности в реальном масштабе времени и т. д.

Применительно к задаче по оцениванию условий возникновения ОППЯ логично использовать метод Шортлифа – Бьюкенена (теория фактора уверенности), обладающий следующими преимуществами [4, 6]:

- возможностью использования всей доступной информации о данном ОППЯ – фундаментальных и теоретических знаний; фактической, прогностической и архивной информации;

- возможностью использования имеющихся единичных экспериментальных данных и экспертных оценок специалистов, при отсутствии достаточного статистического ряда результатов наблюдений (что требуется, например, в схеме Байеса);

- отсутствием необходимости анализа взаимосвязей с различными частями исходных данных;

- возможностью использования простых механизмов вычислительного процесса;

- наличием возможности изменения алгоритма решений на любом этапе применения метода;

- отсутствием необходимости строить заранее структурированное дерево решений;

- наличием возможности автоматизации процесса оценивания степени опасности ОППЯ, что дает возможность разработать автоматизированную экспертную систему анализа каждого такого процесса и явления в отдельности.

Смысл метода Шортлифа – Бьюкенена заключается в замене понятия $P(H_j/X)$ – условной вероятности гипотезы H_j при свидетельстве X – на понятия [6]:

$D[H_j/X]$ – мера доверия к гипотезе H_j при свидетельстве X со значениями в интервале $[0, 1]$;

$HD[H_j/X]$ – мера недоверия к этой же гипотезе H_j при свидетельстве X , значения тоже в интервале $[0, 1]$, как и значения самой вероятности;

$K[H_j/X]$ – коэффициент уверенности в гипотезе H_j , со значениями, соответственно, в интервале $[-1, 1]$.

Меры доверия (D , HD , K) рассчитываются по следующим соотношениям [5]:

$$D[H_j/X] = \begin{cases} \frac{P(H_j/X) - P(H_j)}{1 - P(H_j)}, & \text{при } P(H_j/X) > P(H_j); \\ 0 & , \text{при } P(H_j/X) \leq P(H_j) \end{cases}; \quad (1)$$

$$HD[H_j/X] = \begin{cases} \frac{P(H_j) - P(H_j/X)}{P(H_j)}, & \text{при } P(H_j/X) < P(H_j); \\ 0 & , \text{при } P(H_j/X) \geq P(H_j) \end{cases}; \quad (2)$$

$$K[H_j/X] = D[H_j/X] - HD[H_j/X], \quad (3)$$

где $P(H_j)$ – априорная вероятность гипотезы H_j , значение которой чаще принимается за 0,5;

$P(H_j/X)$ – условная вероятность гипотезы H_j , при свидетельстве (комплексе свидетельств) $X(x_i)$; $P(H_j/x_i)$ задается экспертами для каждого свидетельства x_i из $i = 1 \div n$ и каждой гипотезы H_j из $j = 1 \div K$.

После перевода экспертных значений $P(H_j/x_i)$ в соответствующие меры доверия по соотношениям (1)–(3) производится их комплексирование по всем x_i в рамках каждой гипотезы H_j с использованием следующих отношений [5]:

$$\begin{aligned}
1. \quad & D[H_j/x_{1,2}] = D[H_j/x_1] + D[H_j/x_2] \cdot (1 - D[H_j/x_1]), \\
& HD[H_j/x_{1,2}] = HD[H_j/x_1] + HD[H_j/x_2] \cdot (1 - HD[H_j/x_1]), \\
& K[H_j/x_{1,2}] = D[H_j/x_{1,2}] - HD[H_j/x_{1,2}], \\
& D[H_j/x_{1,2,3}] = D[H_j/x_{1,2}] + D[H_j/x_3] \cdot (1 - D[H_j/x_{1,2}]), \\
& HD[H_j/x_{1,2,3}] = HD[H_j/x_{1,2}] + HD[H_j/x_3] \cdot (1 - HD[H_j/x_{1,2}]), \\
& K\left[\frac{H_j}{x_{1,2,3}}\right] = D\left[\frac{H_j}{x_{1,2,3}}\right] - HD\left[\frac{H_j}{x_{1,2,3}}\right] \text{ и т. д.}
\end{aligned} \tag{4}$$

2. В результате для каждой гипотезы H_j ($j = 1 \div K$) рассчитываются меры доверия по всему комплексу $X(x_i)$ [5]:

$$D[H_j/X]; HD[H_j/X]; K[H_j/X].$$

Из всех гипотез, как наиболее достоверная, выбирается та, где выполняется условие

$$\begin{aligned}
D\left[\frac{H_j}{X}\right] &= \max D\left[\frac{H_j}{X}\right], \\
K[H_j/X] &= \max K[H_j/X],
\end{aligned} \tag{5}$$

что, собственно, и является решением задачи по выбору «правильного» ответа при идентификации суждения (факта), отраженного в гипотезе H_j .

Результаты идентификации (экспертирования) оформляются в виде таблиц, графического и картографического материала в различных вариантах, на любых этапах процесса анализа, контроля и разработки рекомендаций органам управления (ВС РФ, МЧС и т. д.).

Аналогичная схема анализа разрабатывается для каждого вида и разновидности ОППЯ, включая набор экспертируемых характеристик (гипотез), комплексы специальных показателей с набором граничных значений, определяющих отношение текущего значения каждого показателя к той или иной гипотезе.

В итоге разработка и реализация на современном ПК набора подобных схем анализа позволит создать инструмент, способный обеспечить ведение в Едином центре оперативного мониторинга и контроля развития большинства ОППЯ на своей территории и, при необходимости, в любом районе земного шара.

Ниже представлены результаты опыта по реализации подобного подхода применительно к анализу сейсмической обстановки в конкретном физико-географическом заведомо сейсмоопасном районе (полуостров Камчатка). В этом опыте экспертированию подверглись ГФУ (условия сейсмической обстановки), благоприятные для формирования в ближайшее пятилетие сильных сейсмических событий (землетрясений) с магнитудой $M \geq 4$.

В качестве исходной информации для подобного экспертирования условий сейсмической обстановки (СО) использовались данные национального и регионального каталогов сейсмических событий глубиной в 20 лет.

В основу слежения за развитием сейсмических процессов, в данном случае, положен анализ временного хода сейсмической деформации ε [6–8]. Тогда

$$\varepsilon(t)_s = \frac{1}{2\mu\nu} \cdot \sum_{i=1}^n M_0^i [\varepsilon \cdot 10^{-8}],$$

где M_0^i – скалярный модуль i -го сейсмического явления (СЯ);

n – число СЯ, произошедших в районе S за время Δt , при этом $\Delta t = t - t_0$, где t – текущее время, t_0 – время начало наблюдений;

μ – модуль сдвига горных пород;

ν – объем горных пород, деформированных сейсмическими явлениями за время Δt .

На такой основе с учетом имеющихся статистических, экспериментальных данных и экспертных оценок формируются идентифицируемые гипотезы под задачу (выявление благоприятных ГФУ), формируется соответствующий комплекс показателей (табл. 1), определяются их граничные значения.

Вся эта информация и поступившая исходная ГФИ после преобразований по схеме (см. рис. 2) сохраняется и поступает в опорную базу данных, используемую для расчета текущих значений показателей (подсистема информационного обеспечения).

Таблица 1

Вариант перечня параметров, характеризующих развитие сейсмотектонических процессов

Название параметра (величины)	Обозначение	Размерность
Фоновый уровень сейсмотектонической деформации за предыдущие 5 лет	ε_1^ϕ	$\varepsilon \cdot 10^{-8}$
Фоновый уровень сейсмотектонической деформации за последние 5 лет	ε_2^ϕ	$\varepsilon \cdot 10^{-8}$
Фоновый уровень сейсмотектонической деформации за последнее полугодие	ε_4^ϕ	$\varepsilon \cdot 10^{-8}$
Средняя фоновая скорость сейсмотектонической деформации за предыдущие 5 лет	\bar{v}_1^ϕ	$\varepsilon \cdot 10^{-8} / \text{ГОД}$
Средняя фоновая скорость сейсмотектонической деформации за последние 5 лет	\bar{v}_2^ϕ	$\varepsilon \cdot 10^{-8} / \text{ГОД}$
Средняя скорость сейсмотектонической деформации за последнее полугодие	\bar{v}_4^ϕ	$\varepsilon \cdot 10^{-8} / \text{ГОД}$
Логарифм отношения средней фоновой скорости деформации за последние 5 лет к средней фоновой скорости деформации за предыдущее пятилетие	$C_2 = \lg \frac{\bar{v}_2^\phi}{\bar{v}_1^\phi}$	—
Логарифм отношения средней скорости деформации за последнее полугодие к средней фоновой скорости деформации за последние 5 лет	$C_4 = \lg \frac{\bar{v}_4^\phi}{\bar{v}_2^\phi}$	—
Сейсмическая активность района в предыдущие 5 лет	A_1	$N_1^{10} / (\text{ГОД} \cdot \text{км}^2)$
Сейсмическая активность района в последние 5 лет	A_2	$N_2^{10} / (\text{ГОД} \cdot \text{км}^2)$
Сейсмическая активность района за последнее полугодие	A_4	$N_4^{10} / (\text{ГОД} \cdot \text{км}^2)$
Отношение сейсмической активности за последние 5 лет к активности за предыдущее пятилетие	$a_2 = \frac{A_2}{A_1}$	—
Отношение сейсмической активности за последнее полугодие к активности за последнее пятилетие	$a_4 = \frac{A_4}{A_2}$	—

* N_i^{10} – число землетрясений с энергией $3 \cdot 10^{10}$ Дж (класса К³10, с магнитудой М³3,3).

Рассчитанные значения показателей поступают в подсистему специальной обработки, где они сравниваются с граничными значениями, что позволяет отнести их к одной из трех качественных градаций (гипотез) ГФУ – опасные, допустимые и безопасные (неблагоприят-

ные для формирования и проявления сильного землетрясения). Распределенные по градациям значения показателей путем нормирования приводятся к безразмерному виду и по правилам метода Шортлифа – Бьюкенена сводятся (сворачиваются) к комплексным оценкам значимости каждой градации в «вероятной» форме (мера доверия – D , $[0, 1]$) [4, 6]. Наличие таких оценок позволяет по их максимальному значению идентифицировать характер складывающейся на данный момент сейсмической обстановки – опасная, допустимая (неочевидная) и безопасная. Надежность таких оценок (уверенность в них) оценивается по рассчитываемому значению коэффициента уверенности K_u , $[-1, +1]$.

Полученные оценки сейсмической активности относятся к району площадью S порядка 1000 км^2 (характерный размер области проявлений достаточно мощного землетрясения).

Для оценивания пространственного распределения сейсмической активности в достаточно крупном регионе его территория разбивается сеткой на равновеликие районы площадью 1000 км^2 каждый, и в каждом из них по приведенной выше схеме оценивается его степень сейсмоопасности на данный момент. Район оценивается как «сейсмоопасный», если версия (градация) «о возможности, с вероятностью $P \geq 0,75$, проявления здесь в ближайшие 5 лет, землетрясения с магнитудой $M \geq 4$ » поддерживается значением коэффициента уверенности $K_u > 0$ ($K_u = 1$ – версия абсолютно истинна, $K_u = -1$ – версия абсолютно ложна).

На выходе получаем поле сейсмической активности исследуемого региона в виде пространственного распределения районов с оценкой их сейсмичности в терминах – сейсмоопасный, неопределенный, сейсмотеопасный. Причем косвенно можно оценивать сейсмоопасность районов по значению K_u : чем $K_u > 0$, тем больше сейсмоопасность и уверенность в этом выводе.

Результаты опыта по оперативной диагностике сейсмотектонической обстановки на полуострове Камчатка на 01.01.2013 г. в картографическом виде представлены на рис. 4 [9, 10].

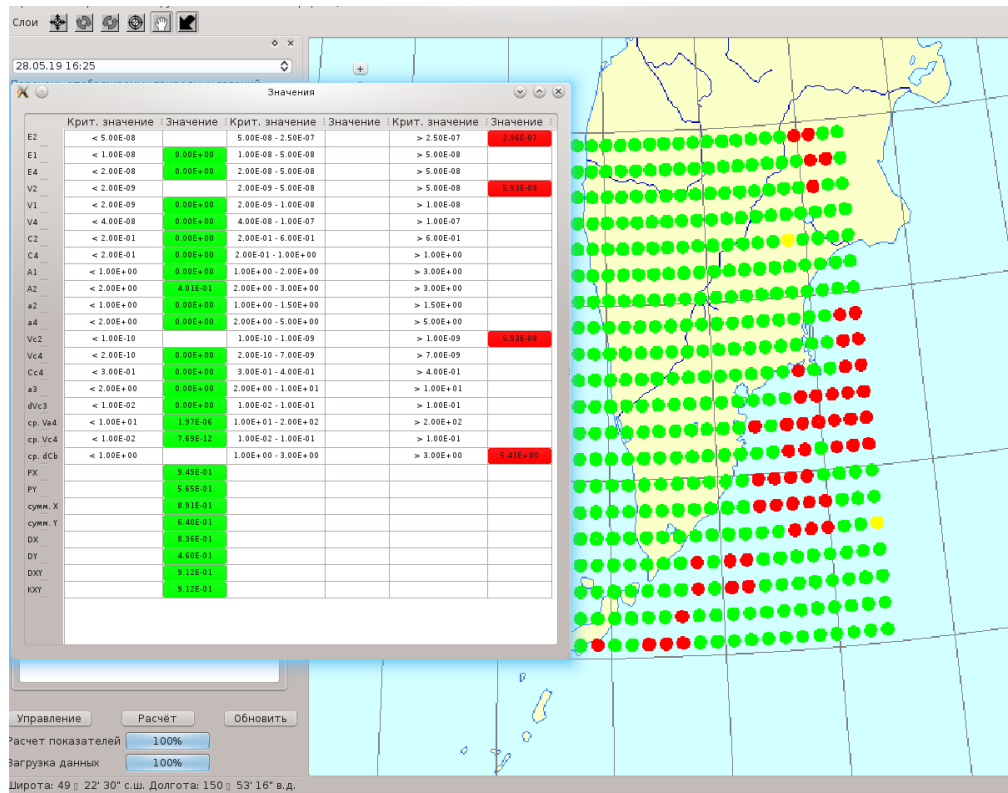


Рис. 4. Карта сейсмической активности района: красные (темные) кружки – сейсмоопасный район; зеленые кружки – несейсмоопасный район

Наличие красной (темной) точки в районе $S(x, y)$ означает, согласно экспертируемой гипотезе, наличие здесь сейсмических условий, благоприятных для проявления в ближайшем окружении, с вероятностью $P \geq 0,75$, в текущем пятилетии сильного землетрясения с магнитудой $M \geq 4$. Иначе говоря, это сейсмоопасный район. На рис. 4 видно, что таких районов здесь довольно много (52 из 400 продиагностированных), и расположены они в основном в океане, вдоль восточного побережья Камчатки, а значительно меньше (7) – на восточной половине территории полуострова. Подобная картина вполне соответствует физическим представлениям о происходящих здесь тектонических процессах (зона соприкосновения азиатской и тихоокеанской плит в районе Курило-Камчатского желоба) и имеющимся оценкам сейсмической активности Камчатского региона [9, 10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблема обеспечения безопасности страны в геофизическом (гидрометеорологическом) отношении требует наличия соответствующей автоматизированной системы мониторинга окружающей природной среды и контроля развития ОППЯ.

В условиях отсутствия адекватной теоретической базы многих ГФП, надежных методов прогнозирования [особенно их критических состояний (ОППЯ)] выполнение основной функции этой системы – «предупреждение» (основная цель – успеть среагировать и принять меры защиты) представляется трудновыполнимой задачей. Проведенные исследования показали, что данная задача может решаться путем создания автоматизированных узкоспециализированных экспертных систем контроля (диагностирования) процессов развития конкретных ОППЯ и их комплексов. В таких системах в основу диагностирования каких-либо процессов положены обработка и анализ больших массивов разнородной информации (теоретической, статистической, экспериментальной, экспертной). Подобные автоматизированные экспертные системы (АЭС) широко используются в различных отраслях науки и техники, особенно там, где имеют дело с неточной, нечеткой, «зашумленной» исходной информацией.

Применительно к проблеме контроля (мониторинга) ОППЯ такая АЭС позволяет решить задачи по приему, обработке, расчету и комплексации значений показателей экспертируемых гипотез развития конкретного ОППЯ и на этой основе осуществляет анализ текущих ГФУ, динамики их развития в направлении ОППЯ и степени опасности на текущий момент времени.

Основными преимуществами предлагаемого подхода к решению проблемы контроля ОППЯ является отсутствие необходимости учета причинно-следственных связей текущего процесса, строгих требований к типу, качеству и точности исходной информации. Все это сильно упрощает расчеты, облегчает автоматизацию процесса диагностики и обеспечивает его оперативность.

Основной недостаток – вероятностный, оценочный характер результатов диагностики, как и у всех автоматизированных систем по поддержке принятия решения.

По своей сути автоматизированная система оперативного контроля ОППЯ (АЭС ОК ОППЯ) представляет собой инструмент в виде узкоспециализированных программно-технических комплексов (ПТК), позволяющих осуществлять оперативный контроль (мониторинг) основных ОППЯ в едином месте (центре).

Перспективы развития АЭС ОК ОППЯ связаны с тем, что она способна в процессе функционирования увеличивать свои возможности и совершенствоваться за счет расширения спектра диагностируемых ОППЯ, перечня экспертируемых гипотез, расширения и уточнения состава специализированных показателей, их значений, изменения и совершенствования математического аппарата, развития форм представления результатов диагностики.

Формирование АЭС ОК возможно в различных вариантах комплектации ОППЯ, наблюдающихся в различных геосферах.

Реализация подобного подхода к контролю ОППЯ во многом и надолго снизит остроту проблемы их прогноза и учета в практике геофизического (гидрометеорологического) обеспечения хозяйственной и военной деятельности, обеспечит накопление физико-статистического, экспериментального материала и развитие на его основе методов прогнозирования ОППЯ, а также потребует совершенствования и развития геоинформационных технологий, информационных систем и коммуникаций.

Список используемых источников

1. Опасные природные процессы / А. В. Баринов [и др.]. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2009. – 334 с.
2. *Нейлор К.* Как построить свою экспертную систему. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 286 с.
3. Экспертные системы. Принципы работы и примеры / А. Брукинг [и др.]; под ред. Р. Форсайта. – М.: Радио и связь, 1987. – 224 с.
4. *Романов В. П.* Интеллектуальные информационные системы в экономике: учеб. пособие / под ред. Н. П. Тихомирова. – 2-е изд., стереотип. – М.: изд-во «Экзамен», 2007. – 496 с.
5. Интеллектуальные системы поддержки принятия решений в нештатных ситуациях с использованием информации о состоянии природной среды / В. А. Геловани [и др.]. – М.: Эдиториал УРСС, 2001. – 304 с.
6. *Ефременко А. Н., Канарский И. Д., Королева О. А.* Методика оперативной диагностики геофизических условий, благоприятных для развития опасных природных процессов и явлений // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 668. – С. 160–169.
7. *Костров Б. В.* Механика очага тектонического землетрясения. – М.: Наука, 1975. – 176 с.
8. *Ребецкий Ю. Л.* Современное состояние теорий прогноза землетрясений. Результаты оценки природных напряжений и новая модель очага землетрясений // Проблемы тектонофизики. К сорокалетию создания М. В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН. – М.: ИФЗ РАН, 2008 – С. 359–395.
9. Сейсмическое районирование СССР / С. В. Медведев [и др.]. – М.: Наука, 1968. – 476 с.
10. Землетрясения России в 2013 году. – Обнинск: ГС РАН, 2015. – 224 с.

Н. А. Козлов*,
кандидат технических наук, доцент;

Д. О. Медяников*,
кандидат технических наук;

А. В. Прокофьев*,
кандидат технических наук, доцент;

Д. В. Сергеев*,
кандидат технических наук;

А. А. Щеколев**

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

**Топогеодезическая служба ГШ ВКС РФ, г. Москва.

ПЕРЕДАЧА ОРИЕНТИРОВАНИЯ ПОСРЕДСТВОМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

В статье предложен подход к передаче ориентирования посредством применения беспилотных летательных аппаратов вертолетного типа (квадрокоптеров), электронных тахеометров и теоретических основ косвенных способов определения ориентирующего угла. Приводятся схема передачи ориентирования между приборами, устанавливаемыми в исходном и позиционном районах через направление воздушной линии между двумя квадрокоптерами, а также алгоритм измерений и расчетные формулы с последующей оценкой точности.

Ключевые слова: передача ориентирования, ориентирующий угол, беспилотный летательный аппарат.

ВВЕДЕНИЕ

В геодезии под передачей ориентирования понимают процесс получения дирекционного угла определяемого направления от сторон геодезической сети. В зависимости от физико-географических и метеорологических условий, наличия приборов и исходных сетей на местности, требований к точности и других факторов могут использоваться различные методы ориентирования (астрономические, гироскопические, геодезические) [1].

При передаче ориентирования геодезическим методом дирекционный угол последней стороны углового хода вычисляют по формуле [2]

$$\alpha_i = \alpha_{\text{исх}} + \sum \beta - 180^\circ(n - 1), \quad (1)$$

где $\alpha_{\text{исх}}$ – дирекционный угол исходной стороны в начале хода;

$\sum \beta$ – сумма измеренных горизонтальных углов в ходе;

n – число измеренных углов в ходе.

Данный способ передачи ориентирования предусматривает выполнение угловых измерений на всех пунктах углового хода. Поэтому его применение проблематично при необходимости преодоления труднопроходимой заболоченной или зараженной токсичными веществами местности в результате возникновения чрезвычайных ситуаций техногенного происхождения. В этой связи в случае невозможности использования астрономических и гироскопических методов ориентирования решение проблемы передачи дирекционного угла направления через труднопроходимые территории представляется своевременной и актуальной задачей.

Целью данной статьи является обоснование подхода передачи ориентирования посредством совместного применения беспилотных летательных аппаратов (БЛА) вертолетного ти-

па (квадрокоптеров), современных геодезических приборов (электронных тахеометров) [3] и теоретических основ косвенных способов геодезического ориентирования [4].

Для достижения поставленной цели решены следующие научные задачи:

- предложен алгоритм и схема передачи ориентирования через направление воздушной линии, фиксируемой положением БЛА, с использованием способа определения угла разворота лимба угломерного прибора [5];
- выполнена оценка точности передачи ориентирования по воздушной линии с учетом точности определения ориентирующих углов приборов;
- проанализированы наиболее выгодные условия определения ориентирующего угла относительно направления воздушной линии.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПЕРЕДАЧИ ОРИЕНТИРОВАНИЯ ПОСРЕДСТВОМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Идея передачи ориентирования через труднопроходимые территории в случае невозможности использования астрономических и гироскопических методов заключается в использовании БЛА в качестве визирных целей, пространственное положение которых последовательно определяются синхронно двумя электронными тахеометрами, расположенными вблизи исходного и определяемого пунктов. Теоретической основой для реализации указанного подхода является способ передачи ориентирования [6].

Решение задачи определения ориентирующего угла электронного тахеометра поясняется схемой (рис. 1), на которой изображены положение исходной стороны AB на земной поверхности, воздушной линии CD между БЛА1 и БЛА2, а также место установки прибора в точке P' (вне вершины угла P на пересечении указанных сторон).

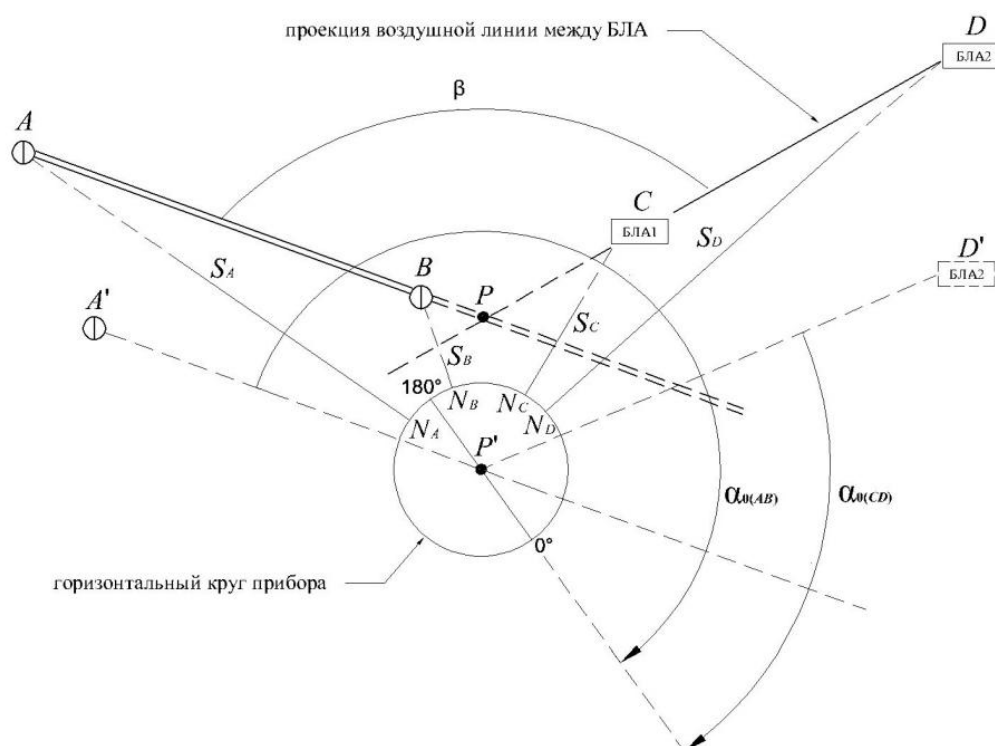


Рис. 1. Схема установки тахеометра в точке P' на некотором удалении от точки пересечения сторон AB и CD

Через центр прибора P' проведены линии $P'A'$ и $P'D'$ параллельно сторонам AB и CD . Ориентирующий угол (разворот горизонтального круга прибора) относительно направления стороны AB соответствует дуге $\cup \alpha_{0(AB)}$, относительно направления стороны CD – дуге $\cup \alpha_{0(CD)}$, а угол между направлениями этих сторон $\beta = \alpha_{0(AB)} - \alpha_{0(CD)}$.

Расчетными формулами для ориентирующих углов прибора относительно направлений сторон AB и CD являются:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha_{0(AB)} &= \frac{S_B \sin N_B - S_A \sin N_A}{-S_B \cos N_B + S_A \cos N_A}, \\ \operatorname{tg} \alpha_{0(CD)} &= \frac{S_C \sin N_C - S_D \sin N_D}{-S_C \cos N_C + S_D \cos N_D}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $N_{A(B,C,D)}$ – измеряемые направления до точек A, B, C и D , закрепляющих стороны AB и CD ;

$S_{A(B,C,D)}$ – измеряемые расстояния до точек A, B, C и D , закрепляющих стороны AB и CD .

Для передачи ориентирования от направления с исходного пункта к направлению в создаваемом районе по направлению воздушной линии CD между БЛА1 и БЛА2 прибор I устанавливают на некотором удалении от центра исходного пункта (ИП), а прибор II – на некотором удалении от узловой точки (УТ) в создаваемом районе (рис. 2). Измеряют направления на ориентирные пункты (ОРП) [6].

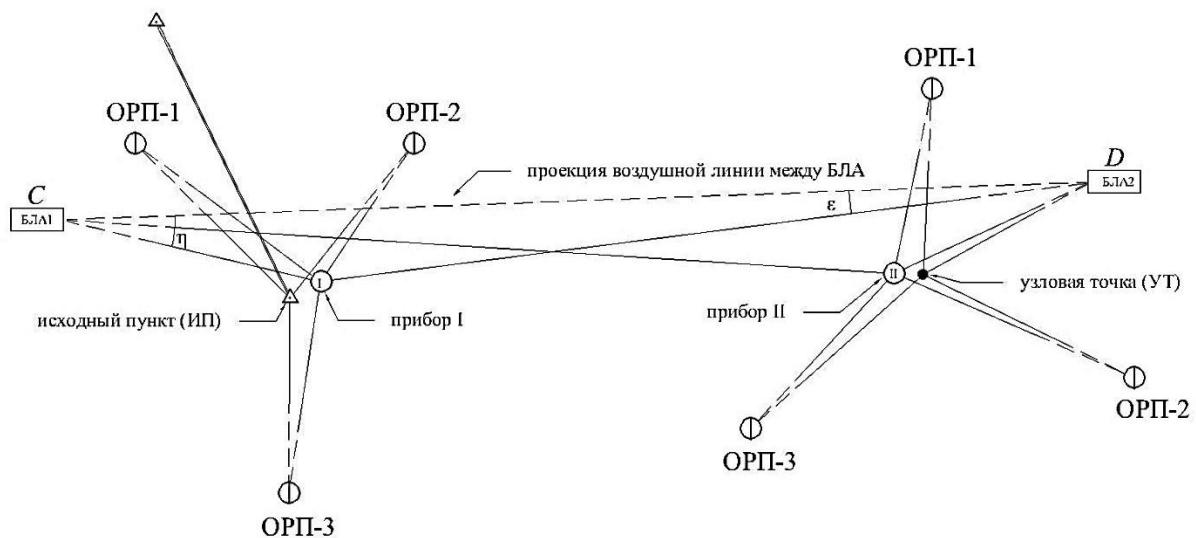


Рис. 2. Схема передачи ориентирования через направление воздушной линии между беспилотными летательными аппаратами

На исходном пункте ориентирующий угол первого прибора $\alpha_{0(I)}$ рассчитывают по дирекционным углам направлений «исходный пункт – ориентирные пункты» (рис. 3), т. е. относительно направления осевого меридиана по формуле [2]

$$\operatorname{tg} \alpha_{0(I)} = \frac{S_1 \sin(N_3 - N_2) \sin(\alpha_1 - N_1) + S_2 \sin(N_1 - N_3) \sin(\alpha_2 - N_2) + S_3 \sin(N_2 - N_1) \sin(\alpha_3 - N_3)}{S_1 \sin(N_3 - N_2) \cos(\alpha_1 - N_1) + S_2 \sin(N_1 - N_3) \cos(\alpha_2 - N_2) + S_3 \sin(N_2 - N_1) \cos(\alpha_3 - N_3)}, \quad (3)$$

где S_i – горизонтальное расстояние от центра исходного пункта до ОРП_{*i*} ($i = 1, 2, 3$);
 α_i – дирекционный угол направления с центра исходного пункта на ОРП_{*i*} ($i = 1, 2, 3$);
 N_i – направление, измеряемое с произвольной точки установки прибора ОРП_{*i*} ($i = 1, 2, 3$).

Ориентирующий угол второго прибора $\alpha'_{0(II)}$ находят по условным дирекционным углам направлений «узловая точка – ориентирные пункты» (рис. 3), т. е. относительно направления оси X' , принимаемого за начало отсчета условных дирекционных углов направлений на ОРП_{*i*}.

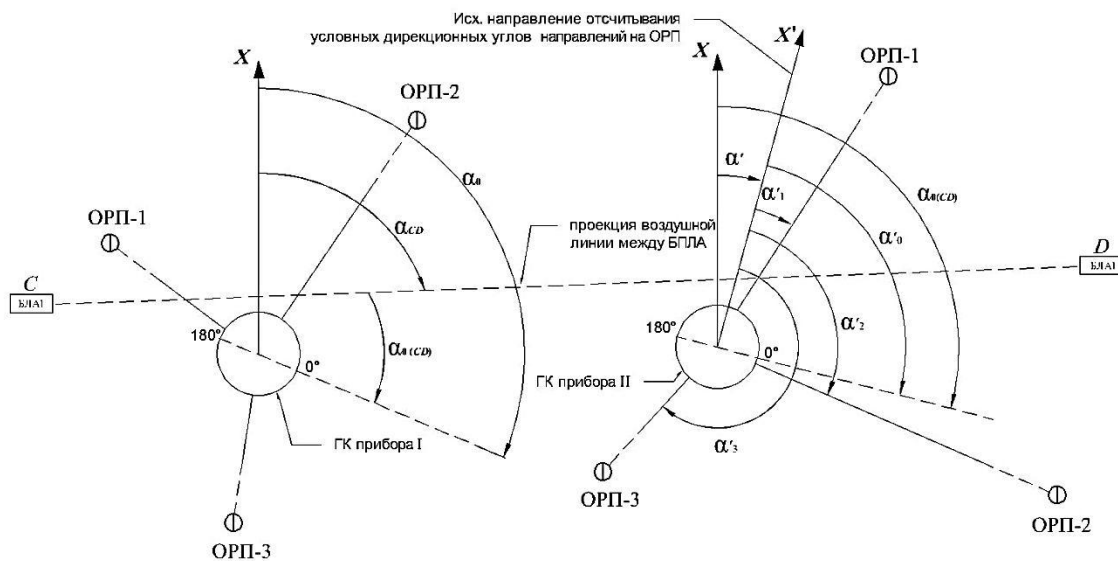


Рис. 3. Схема к определению ориентирующих углов приборов в исходном и позиционном районах

Выводят БЛА1 в точку C и синхронно тахеометрами I и II измеряют направления и расстояния до него, а БЛА2 – в точку D и выполняют аналогичные измерения (см. рис. 2). По измерениям с исходного пункта вычисляют ориентирующий угол прибора по направлению воздушной линии $\alpha_{0(CD)}$:

$$\operatorname{tg} \alpha_{0(CD)} = \frac{S_C \sin N_C - S_D \sin N_D}{-S_C \cos N_C + S_D \cos N_D}. \quad (4)$$

По разности с ранее определенным ориентирующим углом находят дирекционный угол направления воздушной линии $\alpha_{(CD)}$ по формуле

$$\alpha_{CD} = \alpha_{0(I)} - \alpha_{0(CD)}. \quad (5)$$

По измерениям прибором II определяют значение его ориентирующего угла по дирекционному углу направления воздушной линии, т. е. относительно направления осевого меридиана [4]:

$$\operatorname{tg} \alpha_{0(II)} = \frac{S_D \sin(\alpha_{CD} - N_D) + S_C \sin(\alpha_{DC} - N_C)}{S_D \cos(\alpha_{CD} - N_D) + S_C \cos(\alpha_{DC} - N_C)}. \quad (6)$$

Затем по разности ориентирующих углов, определяемых относительно дирекционного угла направления воздушной линии и условных дирекционных углов направлений на ОРП_{*i*},

находят угол α' между направлением осевого меридиана и исходного направления отсчитывания условных дирекционных углов направлений на $ОРП_i$:

$$\alpha' = \alpha_{0(ш)} - \alpha'_{(ш)}. \quad (7)$$

Вычисляют дирекционные углы направлений «узловая точка – $ОРП_i$ »:

$$\alpha'_{ОРП_i} = \alpha' + \alpha'_i \quad (8)$$

где α'_i – условный дирекционный угол направления с узловой точки на $ОРП_i$.

Средняя квадратическая погрешность (СКП) передачи ориентирования по воздушной линии зависит от СКП определения четырех ориентирующих углов

$$m^2 = m_1^2 + m_2^2 + m_3^2 + m_4^2, \quad (9)$$

- где m_1 – СКП определения ориентирующего угла прибора на исходном пункте по дирекционным углам направлений на $ОРП_i$;
 m_2 – СКП определения ориентирующего угла прибора на исходном пункте по направлению воздушной линии;
 m_3 – СКП определения ориентирующего угла второго прибора по направлению воздушной линии;
 m_4 – СКП определения ориентирующего угла второго прибора по условным дирекционным углам направлений «узловая точка – $ОРП_i$ ».

Точность передачи ориентирования возрастает с увеличением числа измерений на $ОРП$ и БЛА. Ориентирующие углы могут вычисляться по средним значениям измеряемых величин. Небольшие перемещения БЛА между отдельными измерениями не отражаются на конечной точности, если измерения на БЛА выполнять синхронно.

Точность определения ориентирующего угла зависит также от геометрических условий размещения $ОРП$ на местности и положения БЛА относительно приборов.

СКП определения ориентирующего угла по трем направлениям с узловой точкой рассчитывают по формуле [4]

$$m_{\alpha_0} = m_N \sqrt{\left(\frac{k_1}{k}\right)^2 + \left(\frac{k_2}{k}\right)^2 + \left(\frac{k_3}{k}\right)^2}, \quad (10)$$

где $k_1 = S_1 \sin(N_3 - N_2)$; $k_2 = S_2 \sin(N_1 - N_3)$; $k_3 = S_3 \sin(N_2 - N_1)$; $k = k_1 + k_2 + k_3$.

Наиболее выгодные условия определения ориентирующего угла создаются, если $k_1 = k_2 = k_3$. Данное условие должно учитываться при установке $ОРП$. Относительно узловой точки пункты размещают равномерно по горизонту примерно на равных удалениях. Тогда при последующих установках прибора внутри треугольника с вершинами $ОРП_i$ ориентирующий угол получают со СКП, близкой к $m_N / \sqrt{3}$ (где m_N – СКП измерения направлений). Чтобы влияние погрешностей измерений тахеометром исходных расстояний с узловой точки до $ОРП$ были на порядок меньше влияния погрешностей измерений направлений, расстояние от места установки прибора до узловой точки не должно превышать $1/50$ расстояния УТ – $ОРП$.

Наиболее выгодные условия определения ориентирующего угла относительно направления воздушной линии появляются, когда прибор размещают на равных расстояниях от БЛА ($m_{\alpha_0} = m_N / \sqrt{2}$).

С приближением к одному из БЛА значение СКП определения ориентирующего угла возрастает до m_N и вне этой стороны превышает m_N . Следовательно, влияние погрешностей измеряемых расстояний снижается с приближением БЛА к направлению стороны двух тахеометров.

Суммарная погрешность ориентирующего угла описывается выражением [4]

$$\Delta\alpha_0 = -\left(\frac{S_C}{S_{CD}}\right)\Delta N_C - \left(\frac{S_D}{S_{CD}}\right)\Delta N_D + \rho\left(\frac{\sin\eta}{S_{CD}}\right)\Delta S_C + \rho\left(\frac{\sin\varepsilon}{S_{CD}}\right)\Delta S_D, \quad (11)$$

где η и ε – углы между измеряемыми направлениями и направлением стороны CD (см. рис. 2), $\rho = 206265''$

В случае отсутствия прямой видимости между тахеометрами БЛА приводят на направления стороны двух приборов створным способом. Для этого первый прибор наводят на дальний БЛА и откладывают от него угол, равный 180° , затем ближний к нему БЛА перемещают до визирной оси трубы тахеометра. Второй прибор наводят на дальний от него БЛА, разворачивают трубу прибора на 180° и перемещают ближний к нему БЛА к направлению трубы. За два-три приближения БЛА совмещаются со створом, создаваемым тахеометрами. Для передачи ориентирования на расстояния, превышающие диапазон измерения дальности тахеометром необходимо создавать угловой ход, состоящий из нескольких воздушных линий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты выполненных исследований позволяют сделать вывод о реализуемости предлагаемого подхода по передаче ориентирования посредством беспилотных летательных аппаратов. При этом достигается технико-экономический эффект: снижаются трудозатраты (отсутствует необходимость выполнения рекогносцировки, создания поворотных точек хода, многочисленных установок приборов и выполнения измерений на территории с особым режимом использования) и, как следствие, повышается оперативность выполнения геодезических работ.

Список используемых источников

1. Основы инженерно-геодезического обеспечения строительства и эксплуатации военных объектов: учеб. пособие для вузов / В. А. Калашников [и др.]. – Л.: ВИКИ им. А. Ф. Можайского, 1980. – 391 с.
2. Руководство по астрономо-геодезическим работам при топогеодезическом обеспечении войск. – М., 1980. – Ч.1. – 423 с.
3. Дементьев В. Е. Современная геодезическая техника и ее применение: учеб. пособие для вузов. – Изд. 2-е. – М.: Академический Проект, 2008. – 591 с.
4. Козлов Н. А. Общая теория косвенных способов геодезического и астрономического ориентирования. – МО СССР, 1979. – 101 с.
5. Способ определения угла разворота лимба угломерного прибора: а. с. СССР № 949338 / Н. А. Козлов. – № 2750651/18-10; заявл. 09.04.79; опубл. 07.08.82, Бюл. № 29. – 1 с.
6. Способ передачи ориентирования: пат. № 2761934 Рос. Федерация / Козлов Н. А., Сергеев Д. В., Медяников Д. О., Прокофьев А. В., Щеколев А. А.; заявитель и патентообладатель ВКА имени А. Ф. Можайского. – № 2021100095; заявл. 11.01.2021; опубл. 14.12.2021, Бюл. № 35. – 1 с.

В. О. Лопуха*;

Н. В. Федосеева*,

кандидат географических наук

*Российский государственный

гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург.

СПУТНИКОВЫЙ СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АКТИВНОСТИ ПОЛЯРНЫХ МЕЗОЦИКЛОНОВ В БАРЕНЦЕВОМ И КАРСКОМ МОРЯХ ЗА 2017–2021 ГОДЫ

Для формирования полярных мезовихрей характерны внезапное ухудшение погоды и возникновение опасных погодных явлений, что делает их исследование одной из наиболее актуальных задач в связи с активным освоением Северного морского пути. В ходе выполнения данной работы на основании получения ежедневных данных мультиспектральной спутниковой съемки с использованием спутниковых данных MODIS Aqua и MODIS Terra был выполнен сравнительный анализ межгодовой и внутригодовой изменчивости повторяемости полярных мезовихрей в Баренцевом и Карском морях за 2017–2021 годы и проанализированы траектории их перемещений.

Ключевые слова: полярные циклоны, мезовихри, спутниковые данные, Баренцево море, Карское море, траектории.

ВВЕДЕНИЕ

Полярные циклоны представляют собой интенсивные мезомасштабные системы низкого давления, обычно генерируемые вторжениями холодного сухого полярного воздуха над теплыми водными массами со стороны полюсов от главного полярного фронта в обоих полушариях. Они характеризуются своим быстрым развитием и коротким временем жизни (обычно 18–36 ч), сильными ветрами и интенсивными конвективными осадками, что делает их опасными для морских перевозок и прибрежной инфраструктуры, когда они выходят на сушу [1].

Полярные циклоны обычно образуются во время вторжений холодного воздуха в направлении умеренных широт. Эти воздушные массы формируются над полями морского льда или полярными континентальными регионами, они холодные и сухие и неустойчиво термически стратифицированы вследствие радиационного охлаждения. В результате адвекции над поверхностью океана возникают сильные восходящие потоки тепла и влаги, которые дестабилизируют воздушную массу и приводят к формированию неглубоких конвективных облачных улиц. Полярные депрессии черпают свою энергию из комбинации бароклинных и диабатических процессов. Относительная роль этих процессов сильно различается, влияя на структуру, интенсивность и внешний вид зрелой полярной депрессии.

Облачная структура полярного минимума варьируется от спиралевидных вихрей до полярных депрессий в виде запятых. Первые имеют более симметричное строение с теплым ядром, а иногда и с безоблачным глазом в центре. Такие полярные циклоны обычно формируются за счет выделения скрытого тепла с небольшой бароклинностью в их зрелой фазе. Более бароклинные минимумы менее симметричны и часто имеют характерную облачную структуру в форме запятой, напоминающую облачность внутритропического циклона, и холодное ядро. Большинство полярных депрессий не относятся к этим двум крайностям и имеют гибридную структуру с комбинированными источниками энергии, которые могут меняться в течение жизненного цикла системы, иногда значительно.

Полярные циклоны формируются, в основном, в зимнее время, так как полярная ночь обеспечивает достаточное радиационное охлаждение полярных воздушных масс для крупномасштабного переноса энергии в системе «атмосфера – море», необходимого для циклогене-

неза [2]. Небольшой размер затрудняет моделирование и прогнозирование их формирования, а единого динамического механизма, управляющего их усилением, не существует. Количественные определения полярных циклонов различаются в разных исследованиях, но за последнее десятилетие исследователи постепенно пришли к определению полярных депрессий как морских циклонов, формирующихся между полюсами и главным полярным фронтом, диаметром менее 2000 км и со скоростями приповерхностного ветра 15 м с^{-1} или выше [3]. Системы, которые не соответствуют этому критерию интенсивности, известны как полярные мезоциклоны.

АНАЛИЗ АКТИВНОСТИ ПОЛЯРНЫХ МЕЗОЦИКЛОНОВ

До недавнего времени не существовало долгосрочных метеорологических архивов, которые позволяли бы выполнить климатический анализ активности полярной депрессии, а реанализ использовался только для изучения связи синоптических условий с развитием полярных депрессий [4, 5]. Только в последнее десятилетие такие исследования стали возможны [6–9]. Давно известно, что Баренцево море является благоприятным регионом для их формирования [1]. Полярные циклоны в восточной части российской Арктики изучены гораздо хуже. Так, например, полярные мезоциклоны над Карским морем были впервые обнаружены сравнительно недавно [10].

Ввиду короткого срока жизни, который колеблется от нескольких часов до трех суток, стадийное деление весьма затруднительно, однако принято выделять три стадии развития полярного мезоциклона (стадия зарождения, стадия максимального развития, стадия заполнения), которые были подтверждены полученными данными со спутников Aqua и Terra (спектрорадиометр MODIS) (рис. 1).

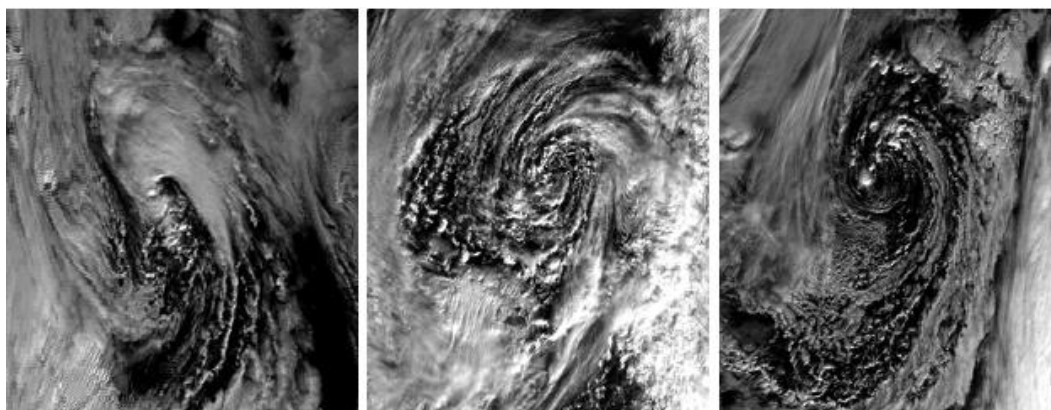


Рис. 1. Стадии развития полярного мезоциклона в акватории Карского моря, слева – стадия зарождения, посередине – стадия максимального развития, справа – стадия заполнения

В ходе выполнения работы были проанализированы данные ежедневной съемки, выполненной датчиком MODIS, который установлен на платформах Aqua и Terra. Использование мультиспектральных и мультиплатформенных данных [11] позволило зарегистрировать короткоживущие мезоциклоны над акваториями Баренцева и Карского морей, с временем жизни менее суток, и проанализировать межгодовую и внутригодовую изменчивость их повторяемости (табл. 1 и 2), а также построить траектории их перемещений.

Сравнительный анализ межгодовой изменчивости повторяемости возникновения полярных мезовихрей в Баренцевом и Карском морях показал неожиданные результаты: наиболее часто они формировались в Карском море – 243 случая за последние 5 лет и 193 случая в Ба-

ренцевом море. Причем эта тенденция наблюдалась на протяжении 4 лет из пяти (2017–2020). Только в 2021 году количество сформировавшихся в Баренцевом море мезоциклонов (50) превысило их количество в Карском море (41). При этом в Баренцевом море наблюдается общая тенденция увеличения их повторяемости из года в год (от 24 в 2017 году до 50 в 2021 году), в то время как в Карском море тенденция к увеличению количества полярных мезоциклонов отсутствует. Абсолютным «рекордсменом» по количеству полярных мезовихрей в Баренцевом море был 2021 год (50 случаев), а в Карском море – 2020 год (57 случаев). Реже всего вихри формировались в Баренцевом море в 2017 году (24 случая) и в Карском море в 2021 году (41 случай).

Таблица 1

**Повторяемость формирования полярных мезовихрей
в акватории Баренцева моря (2017-2021)**

Месяц	2017	2018	2019	2020	2021	Всего
Январь	3	5	4	6	4	22
Февраль	2	6	3	5	6	22
Март	3	5	6	6	5	25
Апрель	3	2	3	3	5	16
Май	2	0	4	4	4	14
Июнь	0	3	2	4	2	11
Июль	1	1	0	1	4	7
Август	2	4	0	3	2	11
Сентябрь	2	1	3	4	2	12
Октябрь	1	2	4	3	6	16
Ноябрь	2	3	3	4	4	16
Декабрь	3	4	4	4	6	21
Всего	24	36	36	47	50	193

Таблица 2

**Повторяемость формирования полярных мезовихрей
в акватории Карского моря 2017–2021 годах**

Месяц	2017	2018	2019	2020	2021	Всего
Январь	6	3	3	7	3	22
Февраль	5	4	4	8	2	23
Март	7	4	5	5	3	24
Апрель	7	5	4	2	3	21
Май	0	3	3	3	3	12
Июнь	4	5	3	4	3	19
Июль	3	4	2	4	2	15
Август	5	4	2	4	7	22
Сентябрь	3	3	3	5	5	19
Октябрь	4	4	2	4	4	18
Ноябрь	4	3	7	5	4	23
Декабрь	5	3	9	6	2	25
Всего	53	45	47	57	41	243

Анализ внутригодовой изменчивости повторяемости полярных мезовихрей показал, что наиболее часто в Баренцевом море вихри формировались в марте (25 случаев за 5 лет), в январе и феврале (по 22 случая за 5 лет), в то время как в Карском море «рекордсменами» по формированию мезоциклонов были декабрь (25 случаев за 5 лет), март (24 случая за 5 лет) и февраль (23 случая за 5 лет). Реже всего вихри наблюдались в Баренцевом море в июле (7 случаев за 5 лет), а в Карском море – в мае (12 случаев за 5 лет).

В Баренцевом море наиболее часто (по 6 случаев) полярные мезовихри формировались в январе 2020 года, феврале 2018 и 2021 годов, марте 2019 и 2020 годов, октябре 2021 года и

декабре 2021 года. В мае 2018 года, июне 2017 года, июле и августе 2019 года над акваторией этого моря не наблюдалось ни одного мезоциклона.

В Карском море самое большое количество полярных мезовихрей возникало в феврале 2020 года (8 случаев) и в декабре 2019 года (9 случаев), а минимальное количество (0 случаев) – в мае 2017 года.

В ходе выполнения работы также были построены траектории перемещения полярных мезовихрей для каждого месяца за все исследованные годы. В качестве примера можно привести данные за 2021 год (рис. 2 и 3).

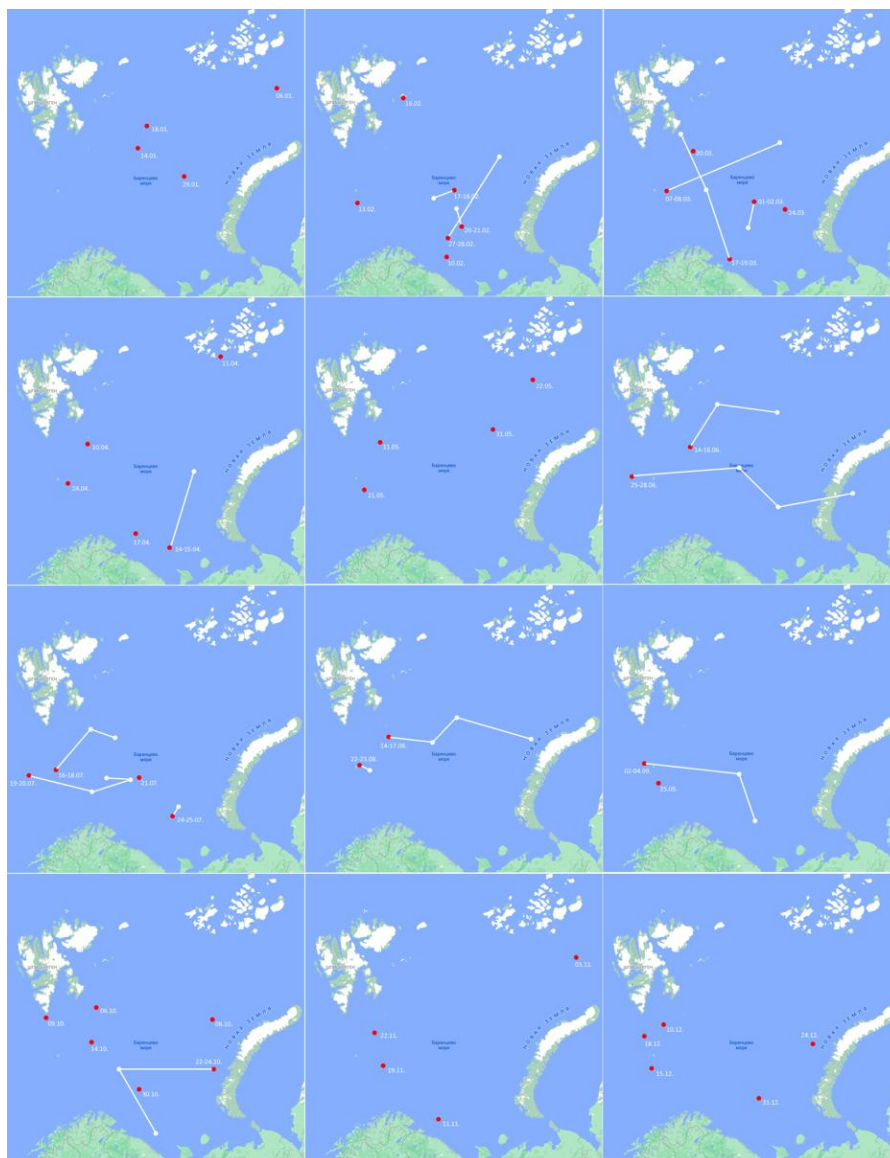


Рис. 2. Траектории полярных мезоциклонов в акватории Баренцева моря (2021)

В Баренцевом море в январе 2021 года сформировались четыре полярных мезоциклона, время их жизни не превышало одних суток, и они оставались неподвижными в регионе их формирования. В феврале наблюдалось шесть мезовихрей, три из которых имели время жизни не более одних суток и также оставались стационарными, а три других – существовали в течение двух суток и перемещались по прямой траектории. В марте над акваторией Баренцева моря сформировались пять полярных мезоциклонов: два с временем жизни, не превышающим одних суток, два – с временем жизни до двух суток и один – просуществовавший трое суток. При этом два мезовихря заполнились в регионе их формирования, а три – имели пря-

молинейные траектории перемещения. В апреле также возникло пять мезоциклонов, четыре из которых оставались стационарными и существовали не более одних суток. В мае все возникшие мезовихри имели время жизни не более суток и оставались неподвижными. В июне

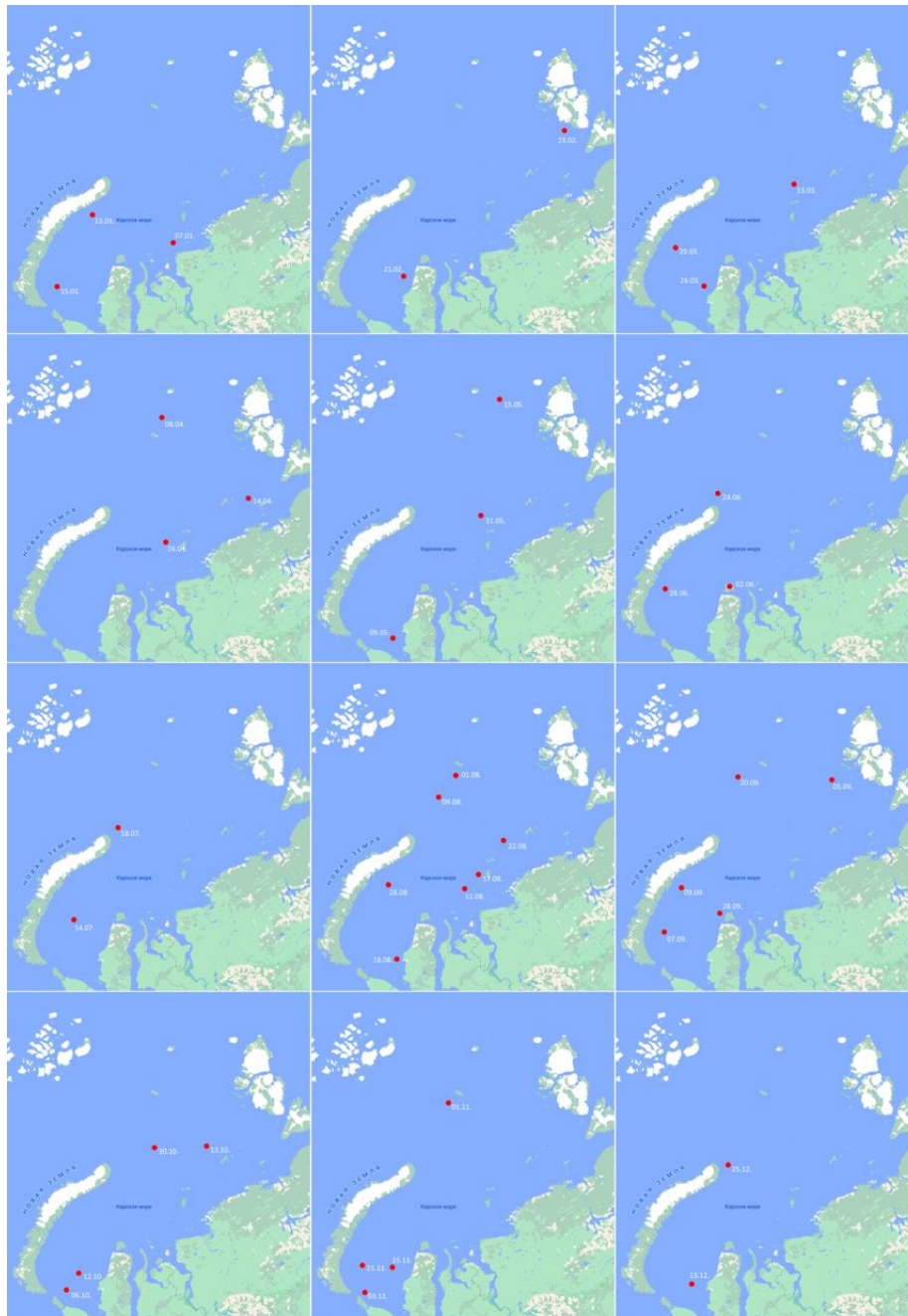


Рис. 3. Траектории полярных мезоциклонов в акватории Карского моря, 2021 г.

оба сформировавшихся мезоциклона имели жизненный цикл от двух до трех суток и перемещались в западном направлении, причем один из них сформировался в Карском море вблизи Новой Земли. В июле один из сформировавшихся мезовихрей просуществовал не более суток и оставался в регионе формирования, два – имели время жизни до двух суток и один – до трех суток. При этом траектории двух мезоциклонов имели сложную форму.

В августе сформировались только два мезовихря, один – с временем жизни до двух суток и прямолинейной траекторией движения, а второй – существовал до трех суток и имел непрямолинейную форму траектории. В сентябре также наблюдалось только два мезовихря.

Один из них существовал не более суток и оставался в регионе формирования, а второй – имел время жизни до трех суток и перемещался по ломаной траектории. В октябре пять из шести полярных мезовихрей просуществовали не более суток и оставались стационарными, а один наблюдался в течение трех суток и перемещался по сложной ломаной траектории. В ноябре все четыре сформировавшихся мезоциклона оставались неподвижными и наблюдались в течение суток. В декабре было пять мезовихрей с аналогичными характеристиками. Таким образом, 34 (68%) из 50 вихрей были стационарны и с временем жизни, не превышающим одних суток.

В 2020 году в Баренцевом море 32 (68%) из 47 мезовихря просуществовали не более суток и оставались в регионе формирования. В 2019 году таких мезоциклонов было 27 (75%) из 36, в 2018-м – 24 (67%) из 36, а в 2017-м – 15 (62,5%) из 24. В целом можно отметить, что количество короткоживущих стационарных мезовихрей в процентном соотношении к общему числу сформировавшихся вихрей из года в год остается примерно одинаковым.

В Карском море все сформировавшиеся в 2021 году полярные мезовихри имели время жизни, не превышающее одних суток, и не смещались из региона их формирования. В 2020 году только один мезоциклон из 57 характеризовался временем жизни более суток и перемещался по прямолинейной траектории. В 2019 году сформировалось 2 из 47 мезовихря с аналогичными характеристиками. В 2018 году в Карском море все наблюдаемые мезоциклоны имели время жизни не более суток и оставались стационарными. В 2017 году 2 из 53 полярных мезовихря характеризовались временем жизни до двух суток и прямолинейными траекториями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнительный анализ траекторий полярных мезоциклонов в Баренцевом и Карском морях в целом показал, что подавляющее большинство полярных мезовихрей в Карском море формировалось вблизи побережья или островов. При этом они оставались стационарными и в целом имели более короткое время жизни, чем вихри в Баренцевом море, которые чаще формировались в центре акватории. Кроме того, мезовихри в Карском море были активнее и характеризовались более продолжительным жизненным циклом.

Список используемых источников

1. *Rasmussen E. A. and Turner J.* Polar lows. – Cambridge University Press, 2003. – 612 с.
2. *Fairles C.* A climatology of North Atlantic polar lows and their phase space derived from thermal wind and thermal asymmetry: a thesis for the degree of Doctor of Philosophy in the Faculty of Engineering and Physical Sciences. – Manchester, 2016. – 208 p.
3. Workshop on Polar Lows. / G. Heinemann [et al.] // *Bulletin of the American Meteorological Society* [130219081637004]. – 2013. – DOI:10.1175/BAMS-D-12-00190.1.
4. *Claud C., Duchiron B., & Terray P.* Associations between large-scale atmospheric circulation and polar low developments over the North Atlantic during winter // *Journal of Geophysical Research*. – 2007. – № 112(D12). – С. 1–16. – DOI:10.1029/2006JD008251.
5. *Kolstad E. W.* A global climatology of favourable conditions for polar lows. // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. – 2011. – № 137(660). – P. 1749–1761. – DOI: 10.1002/qj.888.
6. *Zahn M., & Von Storch H.* A long-term climatology of North Atlantic polar lows // *Geophysical Research Letters*. – 2008. – № 35(22). – P. 1–6. – DOI:10.1029/2008GL035769.
7. *Chen F., & Storch, H. Von.* Trends and Variability of North Pacific Polar Lows // *Advances in Meteorology*. – 2013.

8. *Crezee, S., Van Delden S., & Spengler T.* An objective climatology of Polar Lows: structure and forcing mechanisms. – University of Bergen, 2013.
9. *Golubkin P., Smirnova J. and Bobylev L.* Satellite-Derived Spatio-Temporal Distribution and Parameters of North Atlantic Polar Lows for 2015–2017 // *Atmosphere.* – 2021. – № 12. – С. 224.
10. *Луценко Э. И., Лагун В. Е.* Проблемы Арктики и Антарктики / ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт // Полярные мезомасштабные циклонические вихри в атмосфере Арктики: справ. пособие. – СПб., 2010 – 97 с.
11. *Лопуха В.О., Федосеева Н.В.* Анализ облачности мезомасштабных полярных вихрей по мультиспектральным спутниковым данным // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 662. – С. 172–175.

Е. Б. Морозов;
А. Н. Шершак

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ ЗАРУБЕЖНЫХ КОСМИЧЕСКИХ КАРТОГРАФИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ГОСУДАРСТВЕННЫХ ТОПОГРАФИЧЕСКИХ КАРТ И ГОСУДАРСТВЕННЫХ ТОПОГРАФИЧЕСКИХ ПЛАНОВ

Представлены результаты исследования возможности использования материалов съемки зарубежных космических картографических систем для создания государственных топографических карт и государственных топографических планов как дополнения к отечественным космическим системам. Рассчитаны зависимости между пространственным разрешением материалов спутниковой съемки и масштабом картографического произведения.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, космические картографические системы, государственные топографические карты, государственные топографические планы.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из видов картографической продукции в военной и гражданской сферах топографо-геодезической деятельности являются государственные топографические карты (ГТК) и государственные топографические планы (ГТП). Будучи источниками информации для решения высокоточных задач, в том числе в области обеспечения обороноспособности и национальной безопасности страны, данные картографические продукты должны соответствовать общегосударственным требованиям, предъявляемым к точности, достоверности и современности государственных карт и государственных планов.

В настоящее время для решения задачи составления и регулярного обновления ГТК и ГТП активно используются материалы космических картографических систем (ККС). Подобный выбор обусловлен: а) высоким пространственным разрешением космических снимков, позволяющим с достаточной достоверностью дешифрировать наземные объекты; б) высокой периодичностью съемки ККС, позволяющей быстро и оперативно получать данные для обновления картографической продукции до актуального состояния.

В целях обеспечения российского топографического картографирования материалами космической съемки, используются отечественные ККС («МиР», «Ресурс-ФЗ» и т. д.). Тем не менее остается актуальным вопрос о возможности применения для решения подобной задачи материалов зарубежных ККС.

Анализ характеристик результатов космической съемки, предоставляемых ведущими зарубежными ККС, а также существующего на данный момент опыта их применения в составлении и обновлении ГТК и ГТП даст возможность определить перспективность использования подобной продукции в качестве дополнения к отечественным космическим снимкам.

Исследование пригодности результатов съемки зарубежных ККС, как исходных картографических материалов для составления картографической продукции различных масштабов, представляет особый научный интерес по причине отсутствия единого узаконенного перечня соответствия данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) конкретным масштабным рядам ГТК и ГТП. В статье рассматривается исследование этой проблемы. Вместе с тем предлагается использовать зависимость между пространственным разрешением спутниковых снимков и масштабом картографической продукции как основной критерий определения пригодности материалов съемки ККС для задач топографического картографирования.

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ СЪЕМКИ ККС В СОСТАВЛЕНИИ И ОБНОВЛЕНИИ ГТК И ГТП

Начиная с конца XX века, по мере развития космической отрасли, возникла тенденция использовать материалы ККС, обладающие высоким пространственным разрешением, в качестве исходных данных для решения задач составления и обновления картографической продукции. Это связано с появлением на орбите новых космических аппаратов, что привело, во-первых, к значительному росту архивов данных ДЗЗ и, во-вторых, к снижению стоимости таких данных.

Под ККС в данном случае следует понимать любые современные космические спутниковые системы, предоставляющие исходные данные для создания картографической продукции. Причем вне зависимости, является ли эта функция их основным предназначением (российский космический картографический комплекс «Комета» и т. д.) или второстепенным после мониторинга отдельных областей поверхности Земли (космический аппарат Aqua MODIS и т. д.).

Создание карт на основе материалов спутниковой съемки включает в себя следующие процессы:

1. Трансформирование и геометрическая коррекция спутниковых снимков. Трансформирование необходимо для корректного отображения пространственных объектов, присутствующих на снимке. Процесс основывается на регистрации спутниковых снимков относительно выбранной системы координат, уточнении значений координат точек снимка, а также определении высот точек местности на снимке при помощи цифровой модели рельефа.

2. Автоматическое дешифрирование и векторизация данных ДЗЗ. Результатом процесса является обработанное картографическое изображение. В рамках рассматриваемого исследования основное внимание уделялось данному процессу в силу его тесной связи с таким качеством материалов съемки ККС, как пространственное разрешение.

Автоматизированное дешифрирование состоит из ряда этапов:

2.1. Предварительная обработка растровых данных. Состоит в масштабировании растра и избавлении растра от шумов, служит в первую очередь для подготовки исходного изображения к процессу классификации, что значительно ускоряет дальнейшее распознавание объектов на снимке.

2.2. Классификация обработанных растровых изображений. Заключается в определении принадлежности каждого конкретного пикселя обработанного растра тому или иному дешифрируемому пространственному объекту. Процесс классификации состоит из следующих подэтапов:

а) формирования обучающей выборки – области снимка, на которой можно однозначно выделить дешифрируемые объекты;

б) обучения классификатора – распознавания и запоминания алгоритмом дешифровочных признаков, вычлняемых из предложенной выборки;

в) применения на практике обученного алгоритма – определения принадлежности пикселей снимка тому или иному пространственному объекту. Конечным результатом процесса классификации является растр классификации.

2.3. Обработка классифицированного растрового изображения. Проводится для очищения обработанного растра от возникших во время классификации шумов (неправильно классифицированных пикселей).

2.4. Преобразование растрового изображения в набор площадных и линейных векторных объектов, формирующих контуры дешифрируемых объектов. Полученные векторные объекты в дальнейшем ложатся в основу составляемого картографического продукта.

Следует отметить, что описанная выше последовательность процессов используется в равной степени как для составления общегеографических и тематических карт, так и для составления и обновления высокоточных ГТК и ГТП.

АНАЛИЗ КАЧЕСТВА МАТЕРИАЛОВ СЪЕМКИ ККС В ЦЕЛЯХ СОСТАВЛЕНИЯ И ОБНОВЛЕНИЯ ГТК И ГТП

Для составления ГТК и ГТП в настоящий момент используются преимущественно материалы съемки отечественных ККС. Однако, учитывая зарубежный опыт, представляет интерес исследование возможности применения данных ДЗЗ, получаемых с иностранных космических аппаратов. Для решения поставленной задачи следует установить требования к качеству материалов зарубежных ККС относительно масштабного ряда ГТК и ГТП, принятого в Российской Федерации.

Материалы съемки ККС классифицируются по следующим критериям: спектральному разрешению и пространственному разрешению. Спектральное разрешение определяется интервалами длин волн электромагнитного спектра, к которым чувствителен принимающий датчик. Область спектра, используемая в ДЗЗ, подразделяется на области видимого света, область инфракрасного излучения и радиоволновую область. Наиболее широкое применение в методах ДЗЗ находит окно прозрачности, соответствующее оптическому диапазону, объединяющему видимую (380–720 нм), ближнюю инфракрасную (720–1300 нм) и среднюю инфракрасную (1300–3000 нм) области спектра.

Пространственное разрешение характеризует размер наименьших объектов, различимых на снимке. В зависимости от качества пространственного разрешения космические снимки подразделяются на следующие группы.

1. Снимки очень низкого разрешения (10 000–100 000 м);
2. Снимки низкого разрешения (300–1 000 м);
3. Снимки среднего разрешения (50–200 м);
4. Снимки высокого разрешения (40–0,3 м).

В рамках данного исследования интерес представляют снимки высокого разрешения, в частности их подклассы: снимки очень высокого (1–10 м) и сверхвысокого разрешения (0,3–0,9 м). Для дальнейших расчетов как основное качество материалов съемки ККС будет рассматриваться пространственное разрешение в панхроматическом режиме съемки не меньше 10 м. Тем не менее следует указать, что эта характеристика качества спутниковых снимков высокого разрешения не единственная [3]. Также следует учитывать:

– количество доступных спектральных каналов. Наличие не менее четырех каналов (в том числе минимум – одного инфракрасного) необходимо для успешного дешифрирования и классификации пространственных объектов, расположенных на снимках;

– периодичность получения данных на одну и ту же область земной поверхности. Частота съемки должна быть в пределах трех суток для обеспечения возможности регулярного обновления картографических продуктов;

– покрытие большой территории при спутниковой съемке. Ширина полосы захвата камеры должна быть не менее 8 км для обеспечения большей площади картографирования.

В табл. 1, составленной на основе открытых данных из сети Internet [4], представлены характеристики функционирующих на данный момент зарубежных ККС, наиболее активно используемых в картографировании. В исследование не включались выведенные из эксплуатации ККС, исходя из логики, что для создания и обновления ГТК и ГТП в первую очередь требуются актуальные исходные данные.

На основании приведенных в табл. 1 данных можно утверждать следующее:

1. ККС CartoSat-2, Landsat-7/8, TERRA (ASTER), WorldView-1 не подходят для задач составления высокоточных ГТК и ГТП по причинам: а) пространственного разрешения снимков, не удовлетворяющего обозначенным ранее требованиям; б) недостаточного количества доступных спектральных каналов.

2. Все прочие ККС удовлетворяют заявленным ранее требованиям к спутниковым снимкам высокого разрешения, и материалы их съемки могут быть использованы для создания российских ГТК и ГТП.

В Российской Федерации ГТК создаются в масштабах 1:10 000, 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000, 1:200 000, 1:500 000, 1:1 000 000. Вместе с тем ГТП составляются в масштабах 1:500, 1:1 000, 1:2 000 и 1:5 000 [1]. Требования к точности составления карт и планов варьируются в зависимости от масштаба, и, соответственно, варьируются требования к качеству исходных материалов.

Таблица 1

**Основные характеристики функционирующих на данный момент
зарубежных ККС**

Космический аппарат (система)	Страна	Дата запуска	Разрешение в панхроматическом режиме, м	Разрешение в мультиспектральном спектре, м	Ширина полосы съемки, км	Периодичность съемки, сутки
CartoSat-2	Индия	10.01.2007	0,8	-	9,6	4
GeoEye-1	США	06.09.2008	0,46	1,84	15,2	3
KOMPSAT-3A	Южная Корея	25.03.2015	0,7	2,8	15	3
KOMPSAT-3	Южная Корея	18.05.2012	0,55	2,2	12	3
Landsat-7	США	15.04.1999	15	30	185	16
Landsat-8	США	11.02.2013	15	30	185	16
Pleiades-1A/1B	Франция	16.12.2011/ 02.12.2012	0,5	2	20	1
SkySat-C	США	21.11.2013	0,65–0,86	0,81-1	200	4
SPOT-6	Франция	09.09.2012	1,5	6	60	3
SPOT-7	Франция	30.06.2014	1,5	6	60	3
TERRA (ASTER)	США	18.12.1999	-	15, 30, 90	60	16
TripleSat	Индия	10.07.2015	0,8	3,2	23,4	1
WorldView-1	США	18.09.2007	0,5	-	17,6	2
WorldView-2	США	08.10.2009	0,46	1,84	16,4	1
WorldView-3	США	13.08.2014	0,31	1,24	13,1	1

На сегодняшний день не существует единого стандарта, устанавливающего минимальные значения пространственного разрешения материалов космической съемки, позволяющие их использовать в качестве исходных данных для создания и обновления картографической продукции соответствующих масштабов. Предлагается для формирования вывода о пригод-

ности либо непригодности материалов съемки зарубежных ККС рассчитать зависимость между пространственным разрешением обрабатываемого изображения и масштабом картографического продукта.

В рамках проводимого исследования для расчета подобной зависимости использовалось значение графической точности карты или плана. Под графической точностью понимается ошибка получения данных с карты, обычно принимаемая за величину 0,1 мм. Таким образом, приняв 0,1 мм в масштабе карты за требование к разрешению снимка, можно рассчитать минимальное значение пространственного разрешения для материалов ККС:

$$p = M * 10^{-4}, \quad (1)$$

где M – масштаб картографического произведения;
 10^{-4} – значение графической точности в метрах.

Используя предложенную формулу, можно вычислить минимальные допустимые значения пространственного разрешения материалов спутниковой съемки для масштабных рядов ГТК и ГТП, принятых в Российской Федерации. Рассчитанные значения представлены в табл. 2.

Таблица 2
Минимальные допустимые значения пространственного разрешения материалов спутниковой съемки для масштабных рядов ГТК и ГТП

Масштаб картографического произведения	Минимальное значение пространственного разрешения материалов ККС, м
1:1 000 000	100
1:500 000	50
1:200 000	20
1:100 000	10
1:50 000	5
1:25 000	2,5
1:10 000	1
1:5 000	0,5
1:2 000	0,2
1:1 000	0,1
1:500	0,05

В дальнейшем, проведя сравнительный анализ данных из табл. 1 и 2, можно сделать вывод о том, что спутниковые снимки высокого пространственного разрешения удовлетворяют требованиям масштабного ряда отечественной картографической продукции, начиная с масштаба 1:100 000. Результаты анализа пригодности данных съемки зарубежных спутниковых систем представлены в табл. 3.

Космические картографические системы, приведенные в табл. 3, соответствующие обозначенным ранее требованиям к данным высокого пространственного разрешения, полностью покрывают масштабный ряд государственных топографических карт. ККС SPOT-6/7 удовлетворяют требования к пространственному разрешению космических снимков для ГТК масштаба 1:25 000, TripleSat, SkySat-C, KOMPSAT-3A/3 удовлетворяют требования к пространственному разрешению космических снимков для ГТП масштаба 1:10 000. Отдельно следует отметить, что материалы съемки ККС GeoEye-1, Pleiades-1A/1B и WorldView-2/3 пригодны для создания ГТП масштаба 1:5 000.

Учитывая, что большинство из перечисленных в табл. 3 ККС являются спутниковыми системами второй либо третьей серии (SPOT-6/7, KOMPSAT-3A/3 и т. д.), можно сделать вывод о росте качества материалов ДЗЗ из космоса. Дальнейшее повышение точности пространственного разрешения спутниковых снимков позволит применять их при создании картографической продукции более крупных масштабов и тем самым обеспечит масштабный ряд ГТП большим выбором высококачественных исходных картографических материалов.

Таблица 3

**Пригодность материалов съемки зарубежных ККС
для создания и обновления картографической продукции
различных масштабов**

Космический аппарат (система)	Разрешение в панхроматическом режиме, м	Соответствующий масштаб картографического произведения
SPOT-6	1,5	1:25 000
SPOT-7	1,5	
TripleSat	0,8	1:10 000
SkySat-C	0,65-0,86	
KOMPSAT-3A	0,7	
KOMPSAT-3	0,55	
Pleiades-1A/1B	0,5	1:5 000
GeoEye-1	0,46	
WorldView-3	0,46	
WorldView-3	0,31	

Следует учитывать, что зарубежные коммерческие спутниковые системы могут быть подвергнуты государственной цензуре стран-владельцев ККС, результатом которой станет потеря достоверности отображения ряда объектов или их полное исчезновение со снимков. Достоверность информации в данном случае необходимо проверять, ориентируясь на данные отечественной спутниковой съемки, для вычленения и исправления неточностей в зарубежных спутниковых снимках.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Материалы съемки ККС в настоящий момент являются ключевым источником актуальных и высокоточных данных для создания картографической продукции, в том числе ГТК и ГТП. За последние годы мировая и отечественная наука продолжает продвигаться вперед в сфере автоматического дешифрирования и классификации спутниковых снимков, тем самым повышая скорость и качество процессов составления и обновления цифровых карт с использованием компьютерных технологий. Одним из основных камней преткновения в данном научном направлении является проблема наличия высококачественных спутниковых данных, удовлетворяющих требованиям к исходным картографическим материалам.

Продланное исследование позволяет заключить, что зарубежные ККС представляют интерес в качестве дополнительных источников исходных картографических материалов для составления отечественных ГТК и ГТП. Это обусловлено соответствием: а) их характеристик минимальным требованиям, предъявляемым к данным высокого пространственного разре-

шения; б) значений пространственного разрешения снимков в режиме панхроматической съемки требованиям масштабного ряда отечественных ГТК и ГТП. Использование данных как отечественной, так и зарубежной спутниковой съемки может решить проблему периодического отсутствия данных ДЗЗ отечественных ККС, в зависимости от времени и места съемки, тем самым расширив возможности создания и обновления картографической продукции.

Список используемых источников

1. ГОСТ Р 51605-2000. Карты цифровые топографические. Общие требования. – М., 2000. – 6 с. – (Система стандартов карты цифровые топографические).
2. *Каримова А. А.* Методические аспекты использования современных материалов космической съемки для обновления цифровых топографических карт и планов городов // Вопросы электромеханики. – 2016. – Т. 152. – С. 29–33
3. *Куваева Н. Л.* Технологии создания электронных ортофотокарт при комплексном использовании аэрокосмических снимков и геоинформационных систем: дисс. ...канд. техн. наук. – М., 2010. – 135 с.
4. ESA Earth Observation Portal. – URL: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/a> (дата обращения: 29.07.2021)
5. *Keskin M.* Investigating the potential of satellite images in topographic map production: M.Sc. Thesis / Istanbul Technical University. – Istanbul, 2013. – 87 p.

Д. Н. Бирюков,
доктор технических наук, доцент;
О. О. Захаров;
П. В. Тимашов

ПОДХОД К СНИЖЕНИЮ РИСКОВ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ, СВЯЗАННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ МАКРОСОВ В ОФИСНЫХ ДОКУМЕНТАХ

Рассмотрена проблема распространения вредоносного программного обеспечения с помощью макросов в офисных документах. Проанализированы существующие политики и механизмы безопасности офисных пакетов. Предложен подход к построению средства защиты, учитывающий недостатки в существующих механизмах. Реализован прототип, подтверждающий применимость подхода в реальных условиях. Выдвинуты предложения по настройке операционных систем семейства Windows для обеспечения безопасной работы с документами.

Ключевые слова: защита информации, вредоносное программное обеспечение, компьютерные атаки, информационная безопасность.

ВВЕДЕНИЕ

В повседневной жизни возникает множество рутинных задач, которые требуют автоматизации. Это касается и работы с офисными приложениями, например, при обработке внешних файлов, отправке документов через Интернет и др. Для их автоматизации в офисных пакетах (*Microsoft Office*, *LibreOffice* и т. д.) предусмотрены макросы – программные алгоритмы действий, записанные пользователем. Однако, как и любые технологии, макросы можно использовать как для полезной деятельности, так и для вредоносной, что открывает широкие возможности не только для рядовых пользователей, но и для нарушителей информационной безопасности.

Офисные документы широко используются злоумышленниками для распространения вредоносных программ по всему миру. Документы *Microsoft Office* являются наиболее применимым типом файлов для доставки вредоносного программного обеспечения под операционные системы семейства *Windows* [1]. Основная причина того, что эти файлы часто применяются в таких компаниях, заключается в том, что сотрудники в организациях постоянно обмениваются ими. Следовательно, пользователи с большей вероятностью загрузят и откроют полученный документ, даже от неизвестного отправителя, чем, например, файл исполняемого или «экзотического» формата. По этой причине злоумышленники применяют их для первоначального проникновения на целевую машину, а затем приступают к дальнейшему заражению хоста.

Вредоносные документы используют подсистему макросов для загрузки и выполнения полезной нагрузки. Некоторые защитные решения, несмотря на то, что учитывают этот вектор атаки, зачастую неэффективно блокируют его.

В данной статье рассматриваются возможности макросов, способы защиты от вредоносных макросов в документах, политики безопасности, написание собственного упрощенного макроса, подход к созданию программного комплекса обнаружения таких документов, полученных из сети Интернет.

ОБЗОР ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПОДСИСТЕМЫ МАКРОСОВ И ВСТРОЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ ЗАЩИТЫ НА ПРИМЕРЕ MICROSOFT OFFICE

Макросы представляют собой программы, написанные на интерпретируемом языке VBA, поддержка которого есть в линейке продуктов *Microsoft Office*. Кроме продуктов *Microsoft*, данный язык поддерживают *LibreOffice*, *CorelDraw*, *AutoCAD* и некоторые другие малоизвестные редакторы. По умолчанию VBA входит в набор устанавливаемых программ при установке *Microsoft Office*, но есть возможность отказаться от его поддержки.

Макросы позволяют получать доступ [2] к следующим объектам:

- содержимому документа;
- интерфейсу офисного приложения и действиям пользователя в нем (например, нажатиям клавиш);
- ресурсам операционной системы при помощи COM и WMI объектов

Указанные возможности подсистемы макросов позволяют автоматизировать рутинные задачи (например, для вставки шаблонов требуется доступ к содержимому документа). Записать макрос для взаимодействия с интерфейсом офисного приложения без разработки позволяют встроенные средства (рис. 1).

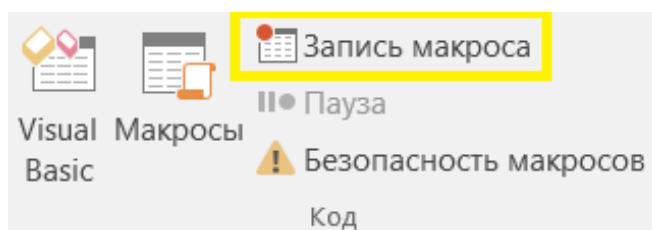


Рис. 1. Кнопка записи макросов на панели быстрого доступа

Доступ к ресурсам операционной системы позволяет сохранять файлы, автоматически отправлять документы по почте и выполнять другие задачи автоматизации. Именно доступ к данным ресурсам позволяет злоумышленникам запускать код на компьютере пользователя – скачивать, запускать и удалять файлы (т. е. *выполнять практически любые действия*).

В *Microsoft Office* существуют встроенные механизмы безопасности:

- защищенный режим просмотра;
- политики запрета исполнения макросов VBA;
- надежные расположения.

В защищенном режиме просмотра запрещается запуск любого содержимого, создается ряд ограничений на процесс, который открывает этот документ. После открытия создается дочерний процесс, аналогично – с рядом ограничений, в котором происходит просмотр документа (рис. 2).

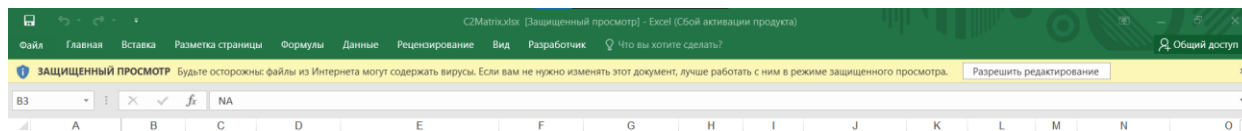


Рис. 2. Оповещение о работе в режиме защищенного просмотра

Политики запрета исполнения макросов VBA позволяют выбрать, какие действия необходимо произвести, как оповестить пользователя или заблокировать исполнение макроса (рис. 3).

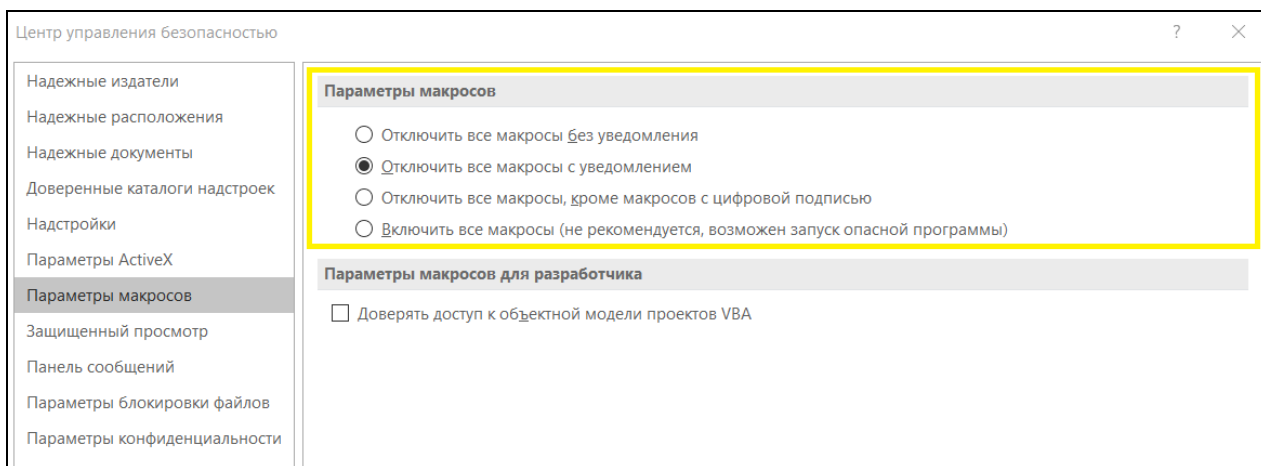


Рис. 3. Управление политикой запрета исполнения макросов

В случае использования опции по умолчанию «Отключить все макросы с уведомлением» при открытии документа с макросом пользователь будет оповещен (рис. 4).

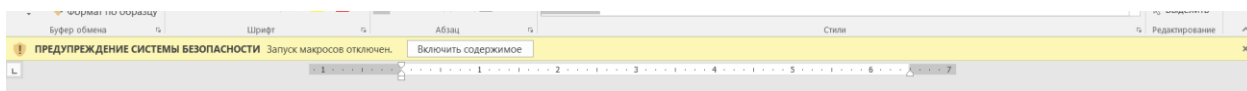


Рис. 4. Предупреждение об отключенном запуске макросов

К файлам из надежных расположений не применяется проверка активного содержимого и режим защищенного просмотра, макросы и код выполняются *без предупреждения*.

ПОЛИТИКИ БЕЗОПАСНОСТИ И ОГРАНИЧЕНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С БЕЗОПАСНОСТЬЮ MICROSOFT OFFICE

Операционные системы семейства *Windows* позволяют различным образом настраивать системы для уменьшения вероятности заражения через вредоносные документы *Microsoft Office*. Для этого используются групповые и облачные политики *Office*, некоторые из них могут соответствовать тем, что описаны выше. Рассмотрим их возможности и требования в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Групповые политики*

Политика безопасности	Описание	Требования	Примечание
Настройка уведомлений о макросах VBA	Определяет вид предупреждений, отображаемых в случае наличия макросов	<i>Microsoft Office</i> 2003 и выше; <i>Windows</i> 2000 и выше; <i>Windows Server</i> 2000 и выше	Отключить все с уведомлением. Отключить все, кроме макросов с цифровой подписью. Отключить все без уведомления. Включить все макросы
Показывать вкладку «Разработчик» на ленте	Если этот параметр политики отключен, вкладка «Разработчик» не будет отображаться на ленте		

Окончание табл. 1

Политика безопасности	Описание	Требования	Примечание
Отключить команды	Если этот параметр включен, можно ввести идентификатор, чтобы отключить конкретную кнопку или пункт меню на панели команд		Идентификаторы кнопок и элементов меню, связанных с макросами, для каждого продукта доступны с целью скачивания на официальном сайте производителя [3]
Отключить VBA для приложений Office	Запрещает приложениям <i>Office</i> использовать компонент <i>Visual Basic</i> для приложений (VBA)		
Надежные расположения	К файлам в надежных расположениях не применяются проверка файлов, проверки активного содержимого и режим защищенного просмотра. Макросы и код в этих файлах будут выполняться без вывода предупреждений для пользователя	<i>Microsoft Office</i> 2007 и выше	
Блокирование запуска макросов в файлах <i>Microsoft Office</i> , полученных через Интернет	Если включить этот параметр политики, макросы будут блокироваться, даже если в разделе «Параметры макросов» в центре управления безопасностью выбран параметр «Включить все макросы»	<i>Windows Server</i> 2008 R2 и выше; <i>Windows</i> 7 и выше; <i>Microsoft Office</i> 2016 и выше	
Настройка правил уменьшения поверхности атаки	Позволяет предотвращать подозрительную активность от приложений <i>Microsoft Office</i>	<i>Windows 10 Pro</i> , корпоративная (версии 1709 и выше); <i>Windows Server</i> (версии 1803 и выше), 2012 R2, 2016, 2019, 2022	Блокировка запуска исполняемого контента приложениями из пакета <i>Office</i> . Блокировка внедрения кода в другие процессы приложениями из пакета <i>Office</i> . Блокировка вызовов Win32 API из приложений <i>Office</i> . Блокировка создания дочерних процессов приложениями <i>Office</i> . Уникальные идентификаторы для правил размещены на официальном сайте производителя [4]
Запускать антивирусную проверку во время выполнения	Определяет, когда файлы <i>Office</i> проверяются в среде выполнения с помощью установленной антивирусной программы	<i>Windows Server</i> 2016; <i>Windows</i> 10; Приложения <i>Microsoft</i> 365 для предприятий;	

* Для групповых политик требуются шаблоны (*.adm, *.admx). Данные файлы доступны на официальном сайте производителя [5].

Таблица 2

Сервис облачных политик для Office

Политика безопасности	Описание	Требования	Примечание
Отключение VBA для приложений Office	Отключает макросы для всех приложений из пакета <i>Microsoft Office</i>	<i>Microsoft 365 Apps</i> для корпораций 1808 версии и выше. Пользователи должны войти в <i>Microsoft 365 Apps</i> с <i>Azure Active Directory</i> аккаунтом. Разрешить доступ в Интернет ряду доменных имен и IP-адресов. С полным списком можно ознакомиться на официальном сайте производителя [6]	Аналогично групповой политике
Настройка уведомлений о макросах VBA	Определяет вид предупреждений, отображаемых в случае наличия макросов		
Запускать антивирусную проверку во время выполнения	Определяет, когда файлы Office проверяются в среде выполнения с помощью установленной антивирусной программы		

Кроме того, существует решение управления мобильными устройствами (MDM) на *Windows 11, 10* в различных вариантах поставки. С его помощью появляется возможность настраивать правила *Windows ASR*. Также с апреля 2022 года начинается рассылка обновления для *Microsoft Office*, которое по умолчанию отключает все макросы в документах, полученных из Интернета [7]. Это существенный шаг на пути уменьшения количества атак, проводимых с помощью вредоносных документов.

Стоит упомянуть тот факт, что «*.docx» не поддерживает макросы – только «*.docm» [8]. Их значки (иконки) заметно различаются, и это может помочь пользователю распознать угрозу (рис. 5). Предыдущий формат «*.doc» поддерживает макросы. Данная особенность присуща и другим типам документов *Microsoft Office*.



Рис. 5. Значки документов *Microsoft Word* («*.docm», «*.docx», «*.doc»)

ПРИМЕРЫ ОБХОДА ВСТРОЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ ЗАЩИТЫ И ОГРАНИЧЕНИЙ

Несмотря на все применяемые меры по защите от вредоносных офисных документов, существуют способы обхода данных ограничений, которые позволяют выполнить код на компьютере.

Обходу ограничений может способствовать применение методов *социальной инженерии* (рис. 6).

Пользователь получает по почте или иному каналу связи документ, при открытии которого отражается уведомление, что он «защищен» или «для просмотра его содержимого необхо-

можно нажать на кнопку «Включить содержимое», что приведет к выполнению макроса. Обычно, для того, чтобы документ выглядел правдоподобно после выполнения макроса, злоумышленники предусматривают изменение содержимого документа – пользователь увидит, что документ изменился после нажатия кнопки, но никакой действительно важной информации находиться не будет.



Рис. 6. Пример содержимого вредоносного документа с макросом

С технической точки зрения социальная инженерия является самым действенным способом обхода ограничений на выполнение макросов. Но даже если у злоумышленника удалось убедить пользователя запустить макрос, есть вероятность того, что защитные средства определяют макрос как вредоносное ПО. Для уменьшения шанса быть обнаруженными средствами защиты киберпреступники зачастую прибегают к обфускации кода макроса. Обфускация кода представляет собой изменение исходного текста программы к виду, сохраняющему функциональность, но затрудняющему анализ. На рис. 7, а и б представлен фрагмент кода на *JavaScript* для демонстрации возможностей обфускаторов кода.

```
function Hello() {
  console.log("Тест обфускации");
}
Hello();
```

```
(function(_0x3f558,_0x2b8033){var _0x670285=_0x2c2f,_0x2bcaac=_0x3f558(),\xwhile(![]){try{var _0x391e5c==parseInt(_0x670285(0x8f))0x1+parseInt(_0x670285(0x8c))0x2+parseInt(_0x670285(0x92))0x3+-parseInt(_0x670285(0x8e))0x4+parseInt(_0x670285(0x88))0x5*(parseInt(_0x670285(0x90))0x6)+parseInt(_0x670285(0x8a))0x7*(parseInt(_0x670285(0x8d))0x8)+parseInt(_0x670285(0x91))0x9;if(_0x391e5c===_0x2b8033){break}else _0x2bcaac[push](_0x2bcaac[shift]());}catch(_0x11faf){_0x2bcaac[push](_0x2bcaac[shift]());}}}_0x5e9f(0xc677a));function _0x5e9f(){var _0x3c1945=[\x39e560iEfwja\x27;2755500cTrLPV,731655loGXAp\x27;3714slZEID\x27;917721HzEPXk\x27;1726638hwAIVoc\x27;1475omezOX\x27;Tectiv20oобфускации\x27;11001389oYcSMV\x27;log];_0x5e9f=function(){return _0x3c1945};return _0x5e9f();}function _0x2c2f(_0x1b63ec,_0x47bef1){var _0x5e9fec=_0x2c2f54;return _0x5e9fec(_0x2c2f54);return _0x416432;}_0x2c2f(_0x1b63ec,_0x47bef1);}function Hello(){var _0x14eda6=_0x2c2f(console[_0x14eda6(0x8b)](_0x14eda6(0x89)));Hello();}
```

Рис. 7. Код до обфускации (а) и после обфускации (б)

Для обфусцирования кода макросов существует множество утилит, находящихся в открытом доступе. Примером подобной программы является *Macro Pack* [9].

Кроме того, исследователями были найдены недостатки в реализации технологии *Windows ASR*, упомянутой выше [10]. Несмотря на то, что корпорация *Microsoft* постоянно совершенствует данный механизм защиты, приведенные в исследовании способы позволяли успешно обходить ограничения и реализовывать различные вредоносные сценарии.

МЕХАНИЗМЫ БЕЗОПАСНОСТИ АНАЛОГОВ MICROSOFT OFFICE

Существуют аналоги *Microsoft Office*:

1. МойОфис.
2. *LibreOffice*.
3. *Open Office*.

Подсистема макросов пакета МойОфис не поддерживает взаимодействие с *Component Object Model (COM)* и внешними DLL [12]. Это позволяет избежать вредоносных воздействий на рабочую станцию посредством макросов. *LibreOffice* и *Open Office* имеют схожие механизмы безопасности:

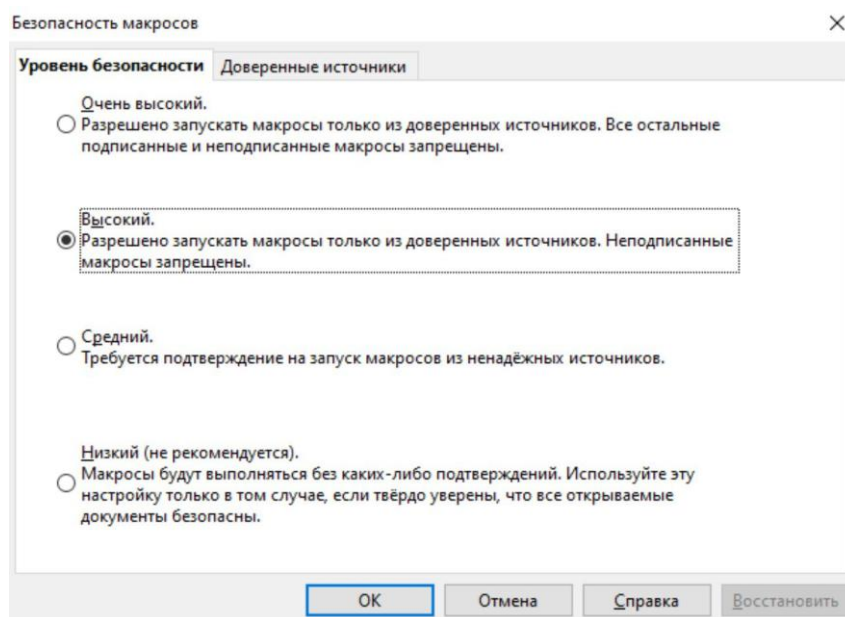


Рис. 8. Настройка уровней безопасности в *LibreOffice/Open Office*

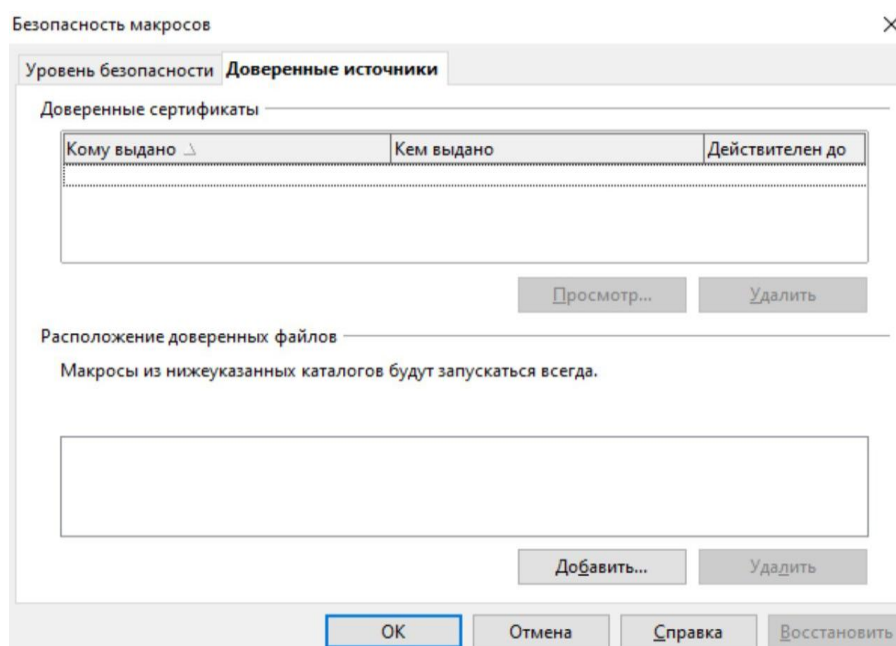


Рис. 9. Настройка доверенных источников

1. Уровни безопасности (рис. 8).
2. Доверенные источники (рис. 9).

По сравнению с политиками безопасности для пакета *Microsoft Office*, решения *LibreOffice* и *Open Office* имеют ряд недостатков, например:

- 1) невозможно отключить документы с макросами, полученные только из Интернета;
- 2) ограничить подозрительную активность можно лишь дополнительными средствами (например, HIPS);
- 3) нет интеграции антивирусного ПО с офисным пакетом.

ПРИМЕР РАЗРАБОТКИ МАКРОСА В MICROSOFT OFFICE ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ

В целях определения возможностей рядового пользователя по созданию потенциально опасного макроса на рабочем месте опишем процесс его разработки от настройки интерфейса до написания программного кода.

Для разработки макроса необходима вкладка «Разработчик» на верхней панели *Microsoft Office*. Отобразить данную вкладку можно через настройки:

1. «Файл» > «Параметры» > «Настроить ленту»;
2. Установить флажок «Разработчик».

Одним из примеров взаимодействия с СОМ будет создание процесса командной строки с аргументами для удаления папки «Документы» на рабочем столе (рис. 10).

```
Sub child_process()  
    CreateObject("WScript.Shell").Run "cmd /c rmdir " & Desktop_Path & "\Документы /q /s", 0  
End Sub
```

Рис. 10. Создание дочернего процесса с аргументами

Функция *CreateObject* возвращает ссылку на ActiveX объект (в данном случае объект для запуска программ). Используя метод *Run*, запускаем процесс командной строки с командой на удаление папки «Документы» с рабочего стола, без запроса подтверждения.

В вышеприведенном примере используется функция *Desktop_Path*, которая возвращает путь к папке рабочего стола при помощи взаимодействия с объектом *Shell.Application* (рис. 11).

```
Function Desktop_Path() As String  
    Const sf_DESKTOP As Variant = 0  
    Desktop_Path = CreateObject("Shell.Application").Namespace(sf_DESKTOP).Self.Path  
End Function
```

Рис. 11. Функция *Desktop_Path*

Подобных объектов для взаимодействия с различными ресурсами достаточно для решения практически любых задач, ознакомиться с ними для конкретного продукта из линейки *Microsoft Office* можно на официальном сайте [13].

Чтобы вышеприведенные функции смогли выполнить свою задачу – удалить папку «Документы» на рабочем столе, необходимо обеспечить запуск макроса. Из нескольких функций для запуска макроса выбираем *AutoOpen*. Собирая весь код воедино, получаем вредоносный макрос (рис. 12).

```

Sub child_process()
    CreateObject("WScript.Shell").Run "cmd /c rmdir " & Desktop_Path & "\Документы /q /s", 0
End Sub

Function Desktop_Path() As String
    Const sf_DESKTOP As Variant = 0
    Desktop_Path = CreateObject("Shell.Application").Namespace(sf_DESKTOP).Self.Path
End Function

Sub AutoOpen()
    child_process
End Sub

```

Рис. 12. Конечный код макроса

Как видно из примера выше, для написания небольшого вредоносного макроса не требуется высокая квалификация, а временные затраты минимальны.

ПОДХОД К ОБНАРУЖЕНИЮ ПОТЕНЦИАЛЬНО ВРЕДНОСНЫХ ОФИСНЫХ ДОКУМЕНТОВ

Проанализировав возможности макросов, способы защиты, обхода ограничений, а также процесс написания макроса для вредоносного воздействия на рабочую станцию, авторами статьи были определены два основных сценария (рис. 13, 14).



Рис. 13. Сценарий с внешним нарушителем

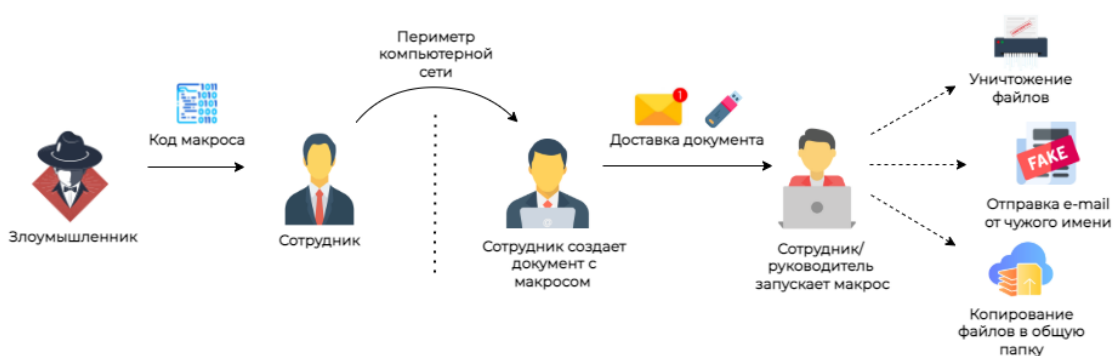


Рис. 14. Сценарий с внутренним нарушителем

Исходя из вышеописанного сценария для внешнего нарушителя, был предложен следующий алгоритм программного комплекса блокировки документов с макросами, полученных из Интернета, для тех систем, в которых установлен *Microsoft Office* до 2016 версии, *LibreOffice* или *Open Office*:

1. Перехват операций с файловой системой.
2. Отбор файлов по расширениям, соответствующим документам *Microsoft Office*.
3. Анализ файла:
 - a. Если расширение «*.docm» или «*.xlsm» – переход к шагу 4.
 - b. Если расширение «*.doc» или «*.xls» – производится поиск и чтение потоков `_VBA_PROJECT` или `Macros` при помощи библиотеки от *Microsoft* для формата CFBF (*Compound File Binary File*) [14].
 - c. Если расширение «*.odt» и *другие* – производится чтение zip-архива и проверяется наличие директории *Basic*, в которой обычно находится макрос.
4. Запрет на загрузку документов с макросами из Интернета – проверяется альтернативный поток данных (ADS) *Zone.Identifier* для уточнения источника файла (*ZoneId=3* – Интернет) [15];
5. Оповещение системного администратора (офицера безопасности) об обнаруженной угрозе.

На основе данного алгоритма был разработан прототип программного комплекса, состоящий из трех компонентов.

1. Драйвер минифilterа файловой системы – получение событий, связанных с работой с файловой системой.
2. Приложение пользовательского режима – взаимодействует с драйвером, обрабатывая запросы на предоставление доступа к файлу.
3. Серверное приложение – принимает сообщения об обнаруженных угрозах от клиентов.

На данный момент обрабатываются следующие типы файлов: «*.doc», «.docm», «.xls», «.xlsm», «.odt».

Серверное приложение является многопоточным. При получении сообщения оно отображает информацию в графическом интерфейсе, оповещает через уведомления оболочки операционной системы (рис. 15).

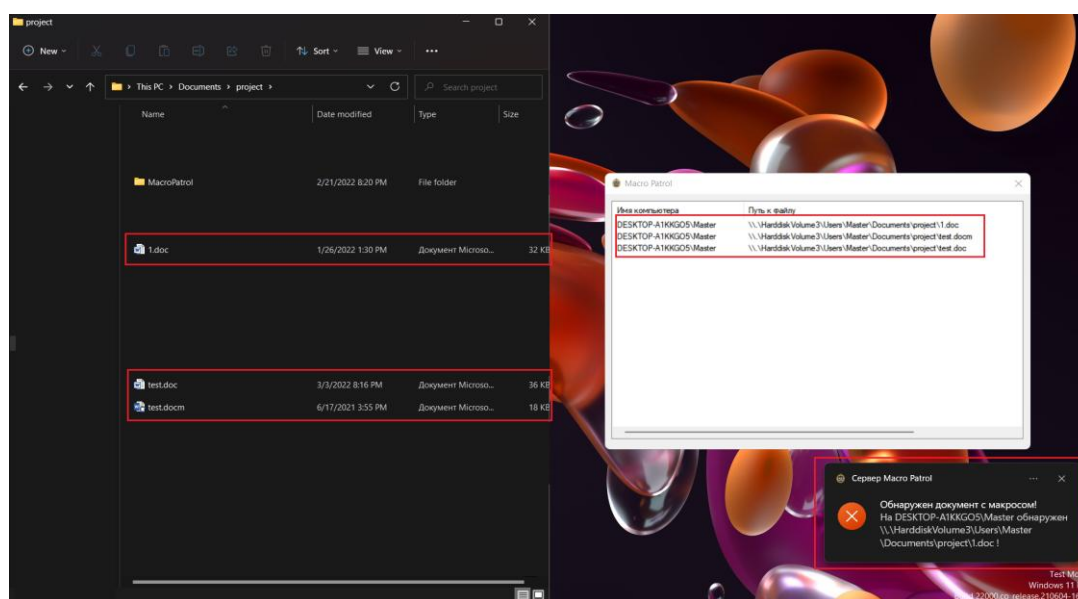


Рис. 15. Пример обнаружения документов, загруженных из Интернета

Проанализировав оба сценария доставки вредоносного кода при помощи макроса и требования к программному обеспечению, можно дать рекомендации, представленные в табл. 3.

Таблица 3

Рекомендации для защиты рабочих станций

Рекомендация	Реализация	Альтернативный вариант
Отключение макросов на тех рабочих станциях, где они не применяются для выполнения рабочих задач	Применение групповой политики «Отключение VBA для приложений Office»	Для <i>LibreOffice</i> , <i>Open Office</i> – уровень безопасности «Очень высокий» без описания доверенных источников
Использовать цифровую подпись для макросов, применяющихся внутри организации (для тех рабочих станций, где они требуются)	Генерация сертификата для подписи кода (утилиты SELF CERT.exe из папки установки Office); Использование групповой политики «Настройка уведомлений о макросах VBA» с проверкой цифровой подписи.	Для <i>LibreOffice</i> , <i>Open Office</i> – уровень безопасности «Высокий», генерация сертификата для подписи кода
Отключить вкладку «Разработчик» для тех пользователей, что используют макросы, но не разрабатывают их	Отключение групповой политики «Показывать вкладку «Разработчик» на ленте»	Удаление подменю «Макросы» при помощи настроек <i>LibreOffice</i> , <i>Open Office</i>
Отключение макросов в документах, загруженных из Интернета	Использование групповой политики «Блокирование запуска макросов в файлах <i>Microsoft Office</i> , полученных через Интернет» для <i>MS Office</i> 2016 и выше; Установка обновления [7]	Использование разработанного программного комплекса для решений <i>MS Office</i> версии ниже 2016, <i>Libre Office</i> и <i>OpenOffice</i>
Использование правил для уменьшения поверхности для атак	Использование групповой политики «Настройка правил уменьшения поверхности атаки» с правилами из табл. 1	Настроить средства защиты информации на блокировку дочерних процессов, внедрения кода и других подозрительных действий от приложений <i>Microsoft Office</i> , <i>Libre Office</i> и <i>OpenOffice</i>
Включить антивирусную проверку во время выполнения приложений <i>Office</i>	Использование групповой политики «Запускать антивирусную проверку во время выполнения».	Использовать сертифицированные средства антивирусной защиты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа возможностей подсистемы макросов офисных пакетов, политик безопасности, механизмов защиты операционных систем семейства *Windows*, связанных с ограничениями по использованию макросов, были выдвинуты рекомендации по противодействию атакам, через вредоносные документы *Microsoft Office* и аналогов. Предложенные рекомендации, сформулированные по итогам анализа, способны помочь администраторам безопасности защитить рабочие станции как от внешних, так и от внутренних нарушителей, пытающиеся осуществить атакующие воздействия посредством применения макросов в офисных документах.

Разработанный программный комплекс для блокирования документов с макросами, полученных из сети Интернет, предназначен для дополнения к политикам безопасности на тех рабочих станциях, где отсутствует требуемое программное обеспечение.

Список используемых источников

1. Ежегодный отчет о фишинге за 2021 год: официальный сайт. – URL: <https://cofense.com/wp-content/uploads/2021/02/cofense-annual-report-2021.pdf> (дата обращения: 03.03.2022).
2. Microsoft: официальный сайт. – URL: <https://docs.microsoft.com/ru-ru/office/vba/library-reference/concepts/getting-started-with-vba-in-office> (дата обращения: 03.03.2022).
3. Microsoft: официальный сайт. – URL: <https://www.microsoft.com/en-us/download/details.aspx?id=50745> (дата обращения: 03.03.2022).
4. Microsoft: официальный сайт. – URL: <https://docs.microsoft.com/ru-ru/microsoft-365/security/defender-endpoint/attack-surface-reduction-rules-reference?view=o365-worldwide> (дата обращения: 03.03.2022).
5. Microsoft: официальный сайт. – URL: <https://www.microsoft.com/en-us/download/details.aspx?id=49030> (дата обращения: 03.03.2022).
6. Microsoft: официальный сайт. – URL: <https://docs.microsoft.com/ru-ru/deployoffice/admincenter/overview-office-cloud-policy-service> (дата обращения: 03.03.2022).
7. Microsoft: официальный сайт. – URL: <https://docs.microsoft.com/ru-ru/deployoffice/security/internet-macros-blocked> (дата обращения: 03.03.2022).
8. Microsoft: официальный сайт. – URL: <https://support.microsoft.com/en-us/office/protect-yourself-from-macro-viruses-a3f3576a-bfef-4d25-84dc-70d18bde5903> (дата обращения: 03.03.2022).
9. MacroPack: репозиторий проекта. – URL: https://github.com/sevagas/macro_pack (дата обращения: 03.03.2022).
10. https://blog.sevagas.com/IMG/pdf/bypass_windows_defender_attack_surface_reduction.pdf
11. Мой Офис: официальный сайт. – URL: https://support.myoffice.ru/upload/iblock/872/MyOffice_Standard_2022.01_Lua_Macros_Reference_Guide.pdf (дата обращения: 03.03.2022).
12. Microsoft: официальный сайт. – URL: <https://docs.microsoft.com/ru-ru/office/vba/api/overview> (дата обращения: 03.03.2022).
13. FileRade: репозиторий проекта. – URL: <https://github.com/microsoft/compoundfilereader> (дата обращения: 03.03.2022).
14. Microsoft: официальный сайт. – URL: [https://docs.microsoft.com/en-us/previous-versions/windows/internet-explorer/ie-developer/platform-apis/ms537183\(v=vs.85\)?redirectedfrom=MSDN](https://docs.microsoft.com/en-us/previous-versions/windows/internet-explorer/ie-developer/platform-apis/ms537183(v=vs.85)?redirectedfrom=MSDN) (дата обращения: 03.03.2022).

А. В. Антропова*;
В. В. Козлов*,
доктор технических наук, профессор;

А. В. Лагун*,
кандидат технических наук, доцент;

К. А. Лямин**

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

**КБСМ, г. Санкт-Петербург.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНИВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ АМОРТИЗАЦИИ ЗАЩИЩАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ

Представлены основные положения математической модели, позволяющей выполнить оценочные расчеты динамических нагрузок, действующих на защищаемые объекты техники при сейсмических воздействиях на них. Импульсное воздействие на защищаемые объекты парируется работой гидравлических демпферов и пневматических амортизаторов. В качестве основных оценочных параметров в расчетах приняты перегрузки и перемещения, воспринимаемые защищаемыми объектами. Результаты выполненных расчетов, позволяют оценить технические параметры систем амортизации и выбрать их значения, удовлетворяющие заданным ограничениям по перегрузкам и перемещениям для защищаемых объектов.

Ключевые слова: защищаемый объект, импульс воздействия, перегрузка, перемещение, динамика движения, параметры амортизации.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из главных проблем, которая возникает при разработке образцов военной и гражданской техники и необходимость решения которой с годами становится все более очевидной, является проблема защиты объектов от сейсмического воздействия при землетрясениях и от ударного воздействия в других аварийных ситуациях. Актуальность этой проблемы особенно возрастает в связи с повышением их многочисленности и неутешительным прогнозом по количеству и мощности возможных землетрясений и их сейсмического воздействия. Основным ее решением, как в прошлом, так и в настоящем времени, являлось создание систем амортизации (СА) высокой эффективности, от которых зависит сохранность объектов и их функционирование после внешнего воздействия поражающих факторов.

АКТУАЛЬНОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЗАЩИЩАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ВНЕШНИХ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

В настоящее время общий объем инвестиций в производство и модернизацию систем амортизации оценивается более чем в 25 млрд. рублей. Направление работ по созданию, модернизации и эксплуатации более 400 систем амортизации с 5000 амортизаторами разных типов следует рассматривать как важнейшую целевую специальную наукоемкую техническую отрасль. На сегодняшний день известны системы общей, групповой и местной амортизации.

Системы общей амортизации применяются для защиты всего объема технологического оборудования и личного состава, размещенного в помещении строительного сооружения.

В качестве амортизируемого объекта в них используются встроенные амортизируемые конструкции.

Системы групповой амортизации применяются для защиты отдельных групп технологического оборудования и личного состава, размещаемых в отведенных зонах помещений строительного сооружения. В качестве амортизируемого объекта в них используются платформы.

Системы местной амортизации применяются для защиты обособленных единиц оборудования в помещениях строительного сооружения, а также для амортизации индивидуальных рабочих мест личного состава.

Рациональным решением, гарантирующим работоспособность серийного оборудования в обычном исполнении и защиту личного состава на высокозащищенном объекте, является применение систем амортизации, обеспечивающих значительную минимизацию общих затрат на создание и эксплуатацию в течение всего жизненного цикла объекта (рис. 1).

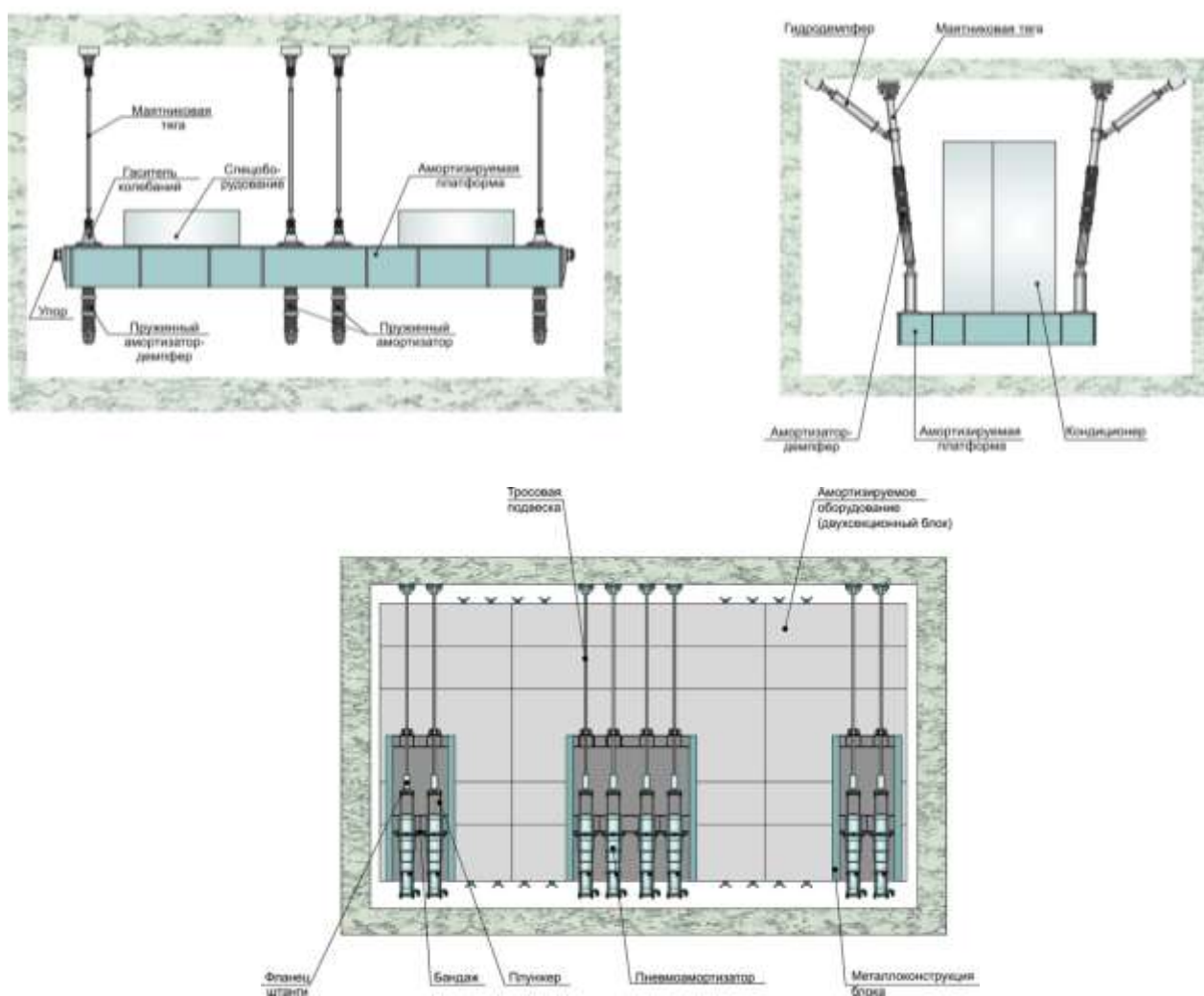


Рис. 1. Система амортизации

Системы амортизации охватывают не более 20–25% площадей защищаемых объектов. При этом фактическая величина сейсмударостойкости оборудования не должна превышать 20g, а ограждающие строительные конструкции в большинстве случаев должны выдерживать и большие входные воздействия. Отсутствие требуемого сейсмударостойкого технологического оборудования накладывает существенные ограничения на проектирование и эксплуатацию технологических систем защищаемых объектов.

Исходя из стоимости элементов защищаемого объекта, следует, что если стоимость применяемого на объекте оборудования будет уменьшена в 5 раз за счет использования серийно выпускаемого промышленного оборудования в обычном исполнении, то высвобождающиеся средства в объеме не менее 20% от стоимости объекта будут достаточными для создания систем и средств амортизации, обеспечивающих гарантированную защиту личного состава и технологического оборудования. Экономия финансовых средств при таком подходе составит не менее 10% от стоимости объекта и при этом не потребуются разработки и поставки оборудования в специальном исполнении по требованиям сейсмостойкости. Одновременно для служб эксплуатации будет реализован один из главных принципов – наличие на постоянной основе серийно производимого оборудования. Анализ результатов эксплуатации защищаемых объектов далеко за пределами гарантийных сроков суммарно с числом более 5000 амортизаторов различного типа показывает, что реально достигнутый срок их службы при сохранении необходимых технических характеристик приближается к 40 годам.

Сегодня актуальным направлением развития систем амортизации защищаемых объектов следует считать использование совокупности результатов фундаментальных, прогнозных и поисковых исследований, прикладных и технологических научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, выполненных в интересах модернизации существующих, создания и производства принципиально новых образцов военной и специальной техники. Для реализации этого направления необходимо проведение математического моделирования процессов функционирования систем амортизации, а результаты такого моделирования следует включить в систему мониторинга этих систем с целью уверенного прогнозирования их работоспособности.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ АМОРТИЗАЦИИ

Целью математического моделирования функционирования систем амортизации защищаемых объектов в условиях внешнего сейсмического воздействия является получение массива данных, необходимых для разработки системы функционального мониторинга исследуемых систем. При создании представленной здесь математической модели динамических процессов функционирования системы амортизации ставилась задача получения лишь оценочных параметров состояния защищаемого объекта при внешнем импульсном воздействии. В качестве расчетной схемы была принята система амортизации (СА), показанная на рис. 2.

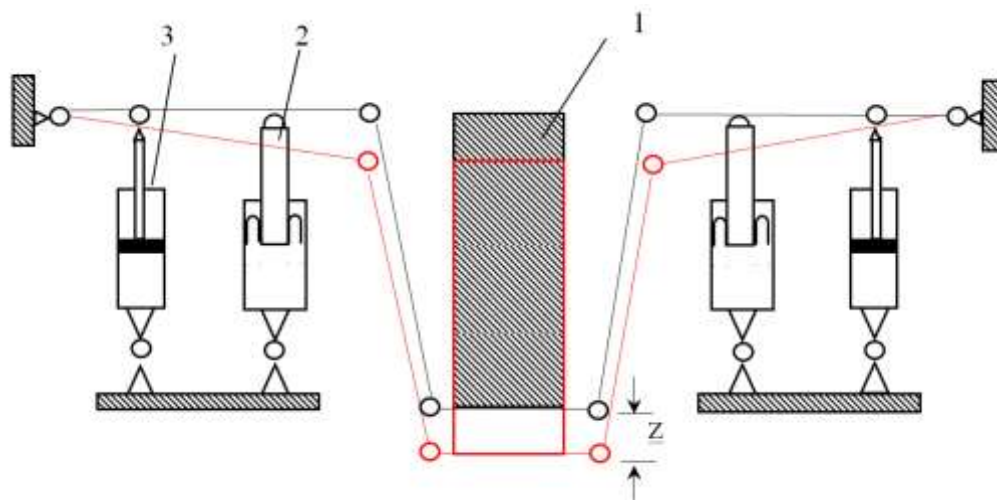


Рис. 2. Расчетная схема:

1 – защищаемый объект; 2 – пневмоамортизатор; 3 – гидравлический демпфер

Конструкция СА, показанной на рис. 1, такова, что в режиме отсутствия внешнего воздействия вес mg защищаемого объекта компенсируется усилием пневмоамортизатора Fa . При этом усилие гидравлического демпфера равно нулю ($Fd = 0$). На рис. 3 представлена расчетная схема для статического положения одной четвертой части системы амортизации.

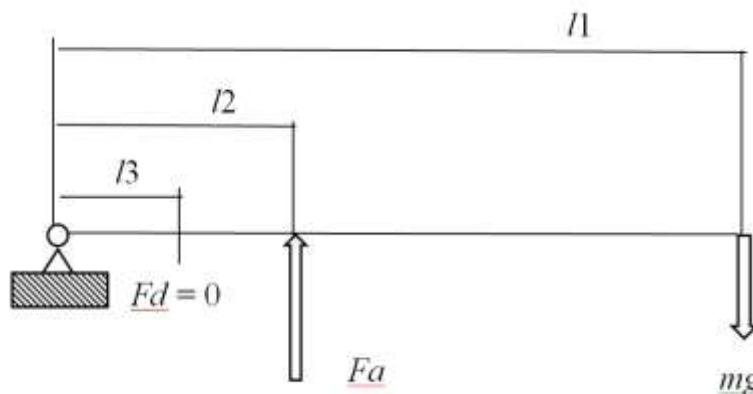


Рис. 3. Статическое положение СА

Сила гидравлического демпфера Fd составляет разницу сил давления в полостях демпфера:

$$\Delta P = fd,$$

где fd – площадь демпфера и силы трения в его поршне $F_{тр}$. Сила трения в поршне демпфера рассчитывалась по соотношению [1]

$$F_{тр} = kt(v) \cdot \sigma_s \cdot \pi \cdot dd \cdot hu \cdot nu,$$

где $kt(v)$ – функция коэффициента трения от скорости перемещения поршня;
 σ_s – напряжение в смятом уплотнении манжеты;
 hu – ширина манжеты;
 nu – количество манжет.

Кроме того, в дальнейших динамических расчетах использовались такие параметры демпфера как: $f\eta$ – относительная площадь контакта манжеты поршня со стенкой цилиндра демпфера, E_p – модуль упругости резины манжеты и Ra – шероховатость зеркала цилиндра. Для статического состояния демпфера в силу наличия дроссельных отверстий в поршне и перепускном клапане принималось, что $\Delta P = 0$.

В режиме сейсмического воздействия усилие пневмоамортизатора Fa оценивается соотношением [2], которое учитывает изменение эффективной площади мембраны пневмоамортизатора от перемещения z , т. е. функции $S1(z)$, а также от значения начального давления p_0 и объема газовой полости V_0 :

$$Fa = p_0 \cdot S1(z) \cdot \left[\frac{V_0}{V_0 + S1(z) \cdot z} \right]^{1.4}.$$

Функционирование СА в условиях сейсмического воздействия заключается в задании импульсного момента, действующего на СА. Такой момент задавался соотношением

$$M_B = P(t) \cdot f \cdot l_1,$$

где $P(t)$ – величина давления в импульсе;
 f – площадь восприятия импульсного воздействия.

Для программной реализации в среде *Mathcad* величина давления в импульсе задавалась функцией

$$P(t) = if(\tau \leq t \leq \tau + td, P1, 0)$$

где τ – время задания импульсного момента, $\tau = 1$ с;
 td – длительность импульса;
 $P1$ – амплитуда импульса.

На рис. 4 показана характерная зависимость функции $P(t)$.

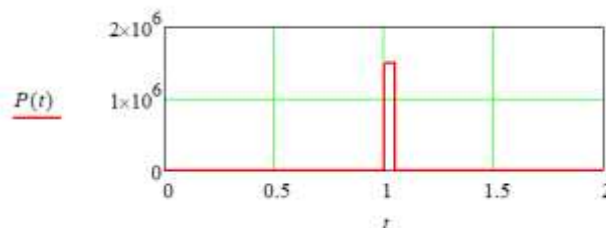


Рис. 4. Импульс внешнего воздействия

Для режима внешнего сейсмического воздействия момент от усилия, развиваемого пневмоамортизатором, оценивался по соотношению

$$Ma = mg \cdot l1 - \left\{ p0 \cdot S1(z) \cdot \left[\frac{V_0}{V_0 + S1(z) \cdot z} \right]^{1.4} \right\} \cdot l2,$$

или в силу того, что

$$mg \cdot l1 = p0 \cdot S1 \cdot l2$$

$$Ma = \left\{ p0 \cdot S1(z) - p0 \cdot S1(z) \cdot \left[\frac{V_0}{V_0 + S1(z) \cdot z} \right]^{1.4} \right\} \cdot l2.$$

При программной реализации динамики работы СА изменения эффективной площади мембраны пневмоамортизатора была использована зависимость, показанная на рис. 5:

$$S1(z) = if(z \geq 0, 0.065, 0.06).$$

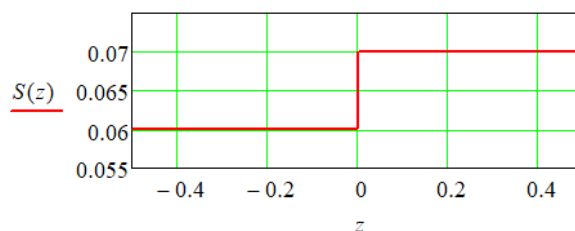


Рис. 5. Изменение эффективной площади пневмоамортизатора

Для режима сейсмического воздействия в расчетах сила трения в гидравлическом демпфере учитывала изменение скорости перемещения поршня v . Учет такой изменчивости был построен на модификации стандартного коэффициента трения в виде

$$kt(v) = kt0 \cdot \frac{1 + 0.0112 \cdot v}{1 + 0.06 \cdot v},$$

для которого введен дополнительный коэффициент, учитывающий изменение знака скорости при колебательных движениях гидравлического демпфера и позволяющий в расчетах уйти от проблемы деления на ноль при изменении знака для скорости. Такой коэффициент имел следующий вид:

$$kt(v) = kt0 \cdot \frac{1 + 0.0112 \cdot v}{1 + 0.06 \cdot |v|} \cdot \frac{v + 0.01}{|v| + 0.01}.$$

Характер изменения коэффициента трения при колебательных процессах смещения поршня демпфера показан на рис. 6.

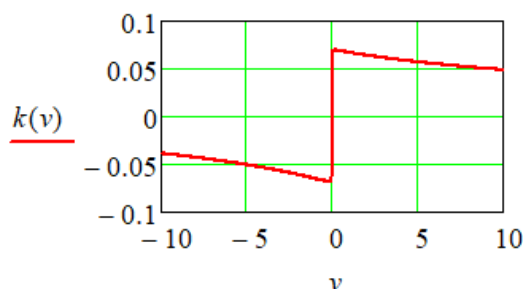


Рис. 6. Изменение коэффициента трения в зависимости от скорости движения, где коэффициент трения покоя $kt_0 = 0.07$

Изменение давления рабочей жидкости в полостях гидравлического демпфера рассчитывалось через изменение производных давления по соотношению

$$\frac{dP}{dt} = \frac{E_g}{fd \cdot (l_0 + z)} \cdot \frac{dV}{dt},$$

где fd – площадь сечения демпфера;
 V – объем перетекающей в демпфере жидкости;
 E_g – модуль сжимаемости рабочей жидкости.

Расчет величины E_g проводился с учетом величины давления P_g в соответствующих полостях гидравлического демпфера и процентного содержания воздуха в рабочей жидкости по соотношению α [3]:

$$E_g = \frac{1}{1.5} \cdot \frac{P_g(t)}{\alpha \cdot (1-\alpha)}.$$

Расход рабочей жидкости между полостями гидравлического демпфера определялся по соотношению

$$\frac{dv}{dt} = (fdr_1 + fdr_2(z(t))) \cdot \mu \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{|P_1 - P_2| + P(t) \cdot \frac{l_1}{l_3}}{\rho}},$$

где fdr_1 – площадь дроссельного отверстия в поршне демпфера;
 $fdr_2(z(t))$ – площадь дроссельных площадей в переливном клапане;
 μ – коэффициент расхода;
 ρ – плотность рабочей жидкости;
 $|P_1 - P_2|$ – перепад давления на поршне;
 $P(t)$ – величина давления в импульсе сейсмического воздействия.

Для проведения модельных расчетов функция $fdr_2(z(t))$ задавалась соотношением $fdr_2(z(t)) = fdr_1 + fdr_2 \cdot \frac{|z(t)|}{l_0}$. В расчетах были также учтены возможные утечки рабочей жидкости между поршнем и зеркалом цилиндра гидравлического демпфера по соотношению

$$Q_{ут} = \frac{\pi \cdot d \cdot |P_1 - P_2| \cdot Ra^2 \left(1 - f\eta \left(\frac{\sigma_s}{E_p} \right) \right)}{12 \cdot \mu_1},$$

где $f\eta$ – относительная площадь контакта;
 E_p – модуль упругости резины;
 Ra – шероховатость зеркала цилиндра;
 μ_1 – динамическая вязкость масла.

Функция $f\eta\left(\frac{\sigma_s}{E_p}\right)$ задавалась соотношением

$$f\eta = K_0\left(\frac{\sigma_s}{E_p}\right)^4 + K_1\left(\frac{\sigma_s}{E_p}\right)^3 + K_2\left(\frac{\sigma_s}{E_p}\right)^2 + K_3\left(\frac{\sigma_s}{E_p}\right) + K_4.$$

В этой формуле $K_0 = 4,57 \cdot 10^3$, $K_1 = 2,047 \cdot 10^3$, $K_2 = 325,863$, $K_3 = 22,057$, $K_4 = 0,41$ – коэффициенты, полученные по регрессионной зависимости в соответствии с данными, приведенными в [4].

Таким образом функция для определения давления в полостях гидравлического демпфера в расчетах задавалась соотношением

$$\frac{dP_g^{1(2)}}{dt} = \frac{\frac{1}{1.5} P_g^{1(2)}(t)}{\alpha \cdot (1-\alpha)} \cdot \frac{dV}{dt} \cdot (\pm 1).$$

Динамика работы СА определялась соотношением действующих в ней моментов:

$$M_{\text{дин}} = -(Ma + Md) + M_b$$

или

$$\frac{d^2z}{dt^2} \cdot m \cdot l_1 = -[(P_1 - P_2) \cdot fd + F_{\text{тр}}] \cdot l_3 - Fa \cdot l_2 + P(t) \cdot f \cdot l_1.$$

Тогда

$$\frac{d^2z}{dt^2} = -[(P_1 - P_2) \cdot fd + F_{\text{тр}}] \cdot \frac{l_3}{l_1 \cdot m} - Fa \cdot \frac{l_2}{l_1 \cdot m} + P(t) \cdot \frac{f}{m}.$$

Таким образом, в расчете использовалась следующая система дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d^2z}{dt^2} = -[(P_1 - P_2) \cdot fd + F_{\text{тр}}] \cdot \frac{l_3}{l_1 \cdot m} - Fa \cdot \frac{l_2}{l_1 \cdot m} + P(t) \cdot \frac{f}{m} \\ \frac{dP_g^1}{dt} = \frac{\frac{1}{1.5} P_g^1(t) \cdot \frac{1}{\alpha \cdot (1-\alpha)}}{fd \cdot (l_0 + z) - Q_{\text{гт}} \cdot t} \cdot \frac{dV}{dt} \\ \frac{dP_g^2}{dt} = \frac{\frac{1}{1.5} P_g^2(t) \cdot \frac{1}{\alpha \cdot (1-\alpha)}}{fd \cdot (l_0 - z) + Q_{\text{гт}} \cdot t} \cdot \left(-\frac{dV}{dt}\right) \end{array} \right. \quad (1)$$

Расчеты системы уравнений (1) выполнялись при модельных значениях исходных данных, среди которых использовались следующие начальные значения:

- объем газовой полости пневмоамортизатора $V_0 = 0,1 \text{ м}^3$;
- давление заправки пневмоамортизатора $P_0 = 6 \text{ МПа}$;
- давление масла гидравлическом демпфере $P_1 = P_2 = 2 \text{ МПа}$;
- амплитуда давления воздействия $P = 3 \text{ МПа}$;
- импульс воздействия $td = 0,05 \text{ сек}$;
- масса груза $m = 6 \cdot 10^4 \text{ кг}$.

Проведенный в этих условиях численный эксперимент показал зависимости, представленные на рис. 7–11.

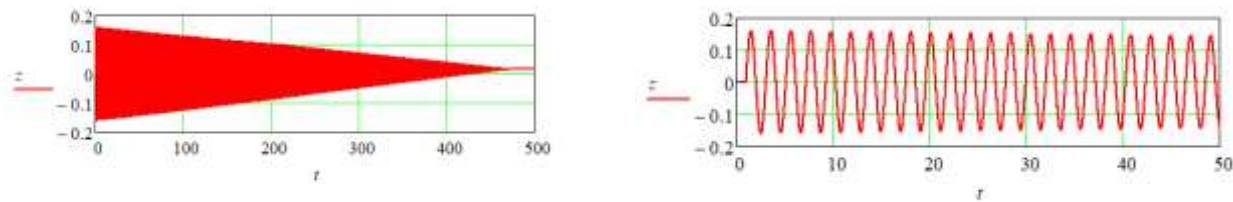


Рис. 7. Перемещение амортизируемого груза

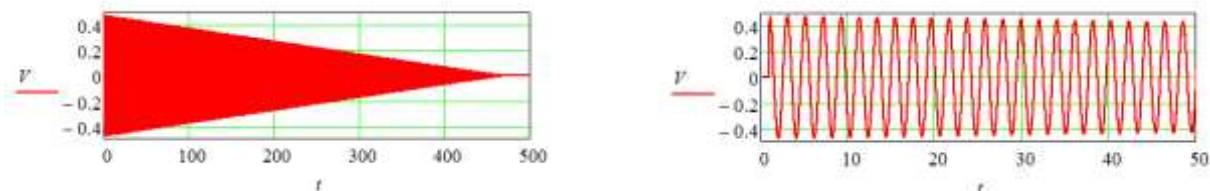


Рис. 8. Скорость перемещения амортизируемого груза



Рис. 9. Перегрузки (PR) амортизируемого груза

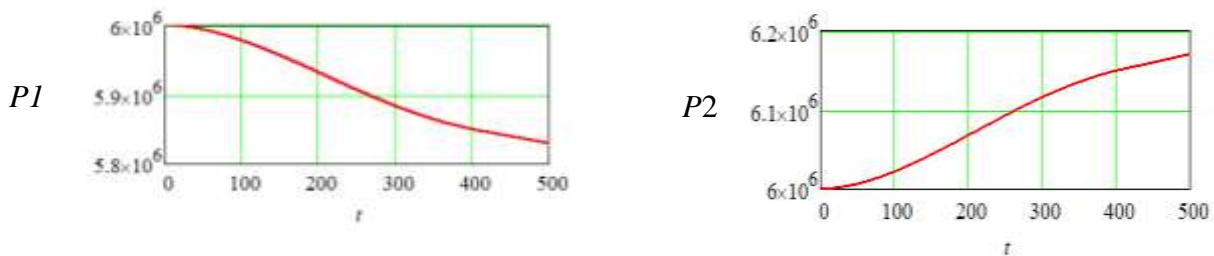


Рис. 10. Давление в верхней (P1) и нижней (P2) полостях гидравлического демпфера

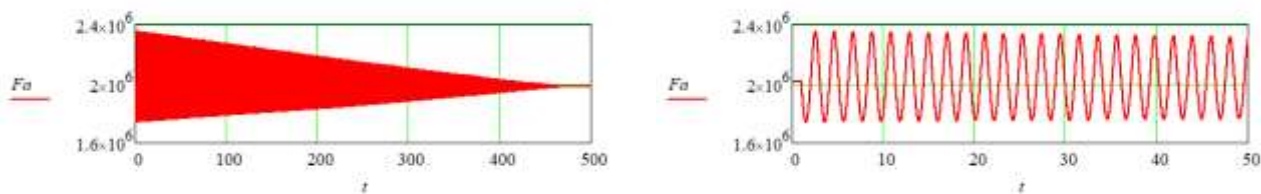


Рис. 11. Изменение силы пневмоамортизатора

Разработанная математическая модель предназначена для ее использования в системе функционального мониторинга СА при выполнении им своего целевого назначения. Математическая модель является комплексной и состоит из имитационной (идеальной) модели, для которой все параметры соответствуют началу эксплуатации. Эта модель может быть дополнена моделями, описывающими процессы деградации материалов и рабочих сред в СА.

Процессы, описываемые математической моделью, обладают необходимой и достаточной информацией о качестве ее функционирования, что позволяет выполнять оценивание технического состояния СА. Математическая модель функционирования СА позволяет имитировать реальные процессы длительной эксплуатации, а также является средством для определения номенклатуры и технических параметров комплекса приборов неразрушающего контроля СА при их длительной эксплуатации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная здесь математическая модель динамических процессов функционирования СА является лишь первым приближением в описании реальных процессов амортизации. Полученные в расчетах оценочные параметры динамики функционирования СА, с одной стороны, указывают на необходимость более подробного моделирования процесса амортизации защищаемого объекта, а с другой – определяют направление для детального оценивания технического состояния таких систем.

Последнее обстоятельство особенно важно для СА, эксплуатируемых за пределами назначенных показателей ресурса.

Список используемых источников

1. Трение, изнашивание и смазка: справочник: в 2 кн. / под ред. И. В. Крагельского. – М.: Машиностроение, 1979. – Кн. 1. – 400 с.
2. Гуськов В. Д., Долбенков В. Г., Лямин К. А. Типовые амортизирующие и демпфирующие устройства систем амортизации, созданные АО «КБСМ» в период с 1960 года по 2017 год. – СПб.: АО «Конструкторское бюро специального машиностроения», 2018. – 216 с.
3. Башта Т. Машиностроительная гидравлика. – М.: Машиностроение, 1971. – 672 с.
4. Трение, изнашивание и смазка: справочник: в 2 кн. / под ред. И. В. Крагельского. – М.: Машиностроение, 1979. – Кн. 2. – 356 с.

С. Г. Бурлуцкий*,

кандидат технических наук, доцент;

А. С. Голосий*,

кандидат технических наук, доцент;

А. П. Ковалёв*,

доктор технических наук, профессор;

Р. В. Сахабудинов**,

кандидат технических наук, доцент

*ГУАП, г. Санкт-Петербург.

**АО «КБ «Арсенал» имени М. В. Фрунзе», г. Санкт-Петербург.

ОЦЕНИВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТОКОВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ИМИТАЦИИ МОЛНИЕВЫХ РАЗРЯДОВ

Представлены аналитические зависимости синтезируемого токового импульса, удовлетворяющего требованиям КТ-160D (G). Предлагаются схемные решения и комплексное устройство, создающее последовательные во времени токовые воздействия заданной величины. Сформированы технические параметры основных компонентов генераторов импульсного тока на высоковольтных импульсных конденсаторах. Результаты моделирования подтверждают правильность построения схем и выбора параметров генераторов.

Ключевые слова: токовый импульс, генератор импульсного тока, фронт токового импульса, время нарастания фронта, электрический контур, высоковольтный генератор, конденсатор.

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на скоротечность процесса вывода космических аппаратов на орбиту, их защита от молниевых разрядов продолжает оставаться актуальной задачей. Абсолютно исключить попадание молнии в ракету-носитель (РН) не возможно, даже путем принятия организационных мер по переносу времени пуска. Не так давно при старте с космодрома Плесецк, на 14-й секунде полета, молния ударила в РН «Союз-2.1б» [1]. Поэтому на стадии проектирования, изготовления и испытаний проводится ряд мероприятий. В частности, для оценки стойкости применяются специальные стенды, имитирующие воздействие молниевых разрядов на различные технические объекты. С их помощью проводятся проверки критического оборудования на стойкость к воздействию различных факторов молниевых разрядов. Накопленный опыт по исследованию молний обобщен в виде руководящего документа – международных квалификационных требований КТ-160D (G) (разделы 22 и 23) [2], который регламентирует объем и порядок испытаний на молниезащиту воздушных судов.

Одной из самых сложных проблем являются испытания сильным током. Обобщенный токовый импульс молниевых разряда, который необходимо в соответствии с требованиями КТ-160D (G) прикладывать при испытаниях, показан на рис. 1.

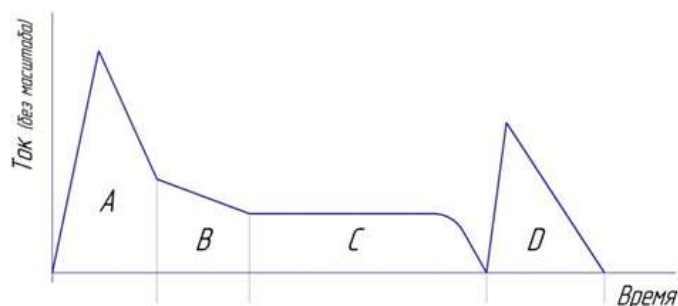


Рис. 1. Форма токового импульса в соответствии с КТ-160D (G)

Анализ некоторых устройств, его воспроизводящих [3], показывает, что данная задача в полной мере не решена или может быть решена на современном инженерном уровне. В настоящей работе показан подход, позволяющий (с учетом развития элементной базы) создать новый комплекс высоковольтного оборудования молниевых разрядов, удовлетворяющий ряду более жестких требований, например, по фронту импульса компонент «А» и «D». При этом в качестве прототипа выбран генератор тока искусственной молнии типа УИТОМ-1 [3], созданный в НИПКИ «Молния» НТУ «Харьковский политехнический институт».

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ СИНТЕЗИРУЕМОГО ТОКОВОГО ИМПУЛЬСА

Дифференциальное уравнение колебательного процесса, протекающего в типовом колебательном контуре при замыкании ключа K (рис. 2), имеет вид [4]

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = X, \quad (1)$$

где q – заряд конденсатора;
 L – индуктивность контура;
 R – активное сопротивление контура;
 C – емкость конденсатора.

Для случая, когда $R = 0$ и колебания тока являются гармоническими и незатухающими имеют место следующие зависимости [4]:

$$T = 2\pi\sqrt{CL}, \quad (2)$$

$$I = I_m \sin(\omega t), \quad (3)$$

где I_m – максимальная амплитуда тока;
 T – период колебаний.

На рис. 3 показана синусоида незатухающих гармонических колебаний с указанием переднего фронта нарастания тока, значение которого является заданным параметром для известных нормативных документов.

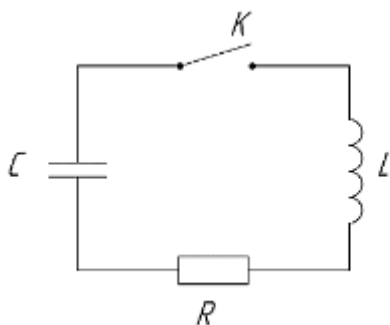


Рис. 2. Типовой колебательный контур

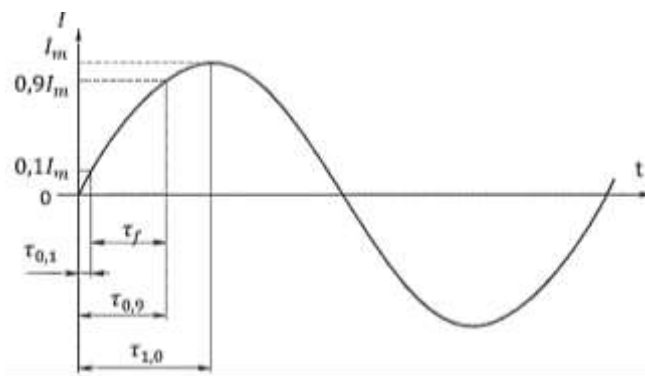


Рис. 3. Синусоида гармонических колебаний

Используя известные зависимости для идеального электрического контура, несложно показать, что

$$\frac{\tau_f}{T} = \frac{\arcsin 0,9 - \arcsin 0,1}{4 \arcsin 1,0}, \quad \tau_f = 0,1625T. \quad (4)$$

Пиковая электрическая и токовая энергии контура имеют значения

$$W = \frac{U_m^2 C}{2} = \frac{I_m^2 L}{2}, \quad (5)$$

где U_m – напряжение зарядки конденсатора.

Влияние времени нарастания фронта токового импульса τ_f на параметры контура имеет следующий характер. Индуктивность контура (если ее не увеличивают специальными техническими средствами) будет определяться его геометрическими размерами и характеристиками подключаемой нагрузки. Для начального анализа примем $L = \text{const}$, тогда для различных заданных значений τ_f и фиксированного I_m можно записать:

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{\tau_{f_1}}{\tau_{f_2}} = \sqrt{\frac{C_1}{C_2}}, \quad \frac{I_m^2 L}{2} = \text{const}, \quad U_{m1}^2 C_1 = U_{m2}^2 C_2. \quad (6)$$

Тогда

$$\left(\frac{\tau_{f_1}}{\tau_{f_2}} \right)^2 = \frac{C_1}{C_2} = \frac{U_{m1}^2}{U_{m2}^2}. \quad (7)$$

Таким образом, для уменьшения значения времени нарастания фронта токового импульса необходимо пропорционально наращивать уровень напряжения зарядки конденсаторной батареи генератора импульсного тока (ГИТ) и уменьшать ее емкость.

Для контура, имеющего активное сопротивление, зависимость для периода колебаний будет иметь вид [4]

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}. \quad (8)$$

Поскольку в рассматриваемом случае нормированным параметром является τ_f , целесообразно получить выражение, связывающее его с основными параметрами контура:

$$T = \frac{2\pi}{\omega}.$$

Учитывая, что $\tau_f = 0,1625T$,

$$\frac{\tau_f}{0,1625} = \frac{2\pi}{\omega} \rightarrow \omega = \frac{1,02}{\tau_f} \quad (9)$$

или

$$\tau_f = \frac{1,02}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}}. \quad (10)$$

При наличии активного сопротивления колебания носят затухающий характер (рис. 4).

Для определения исходной величины энергии, запасаемой конденсаторной батареей, используем зависимость для затухания амплитуды тока от времени колебательного процесса [4]:

$$I = I_0 e^{-\beta t}, \quad (11)$$

где

$$\beta = \frac{R}{2L}. \quad (12)$$

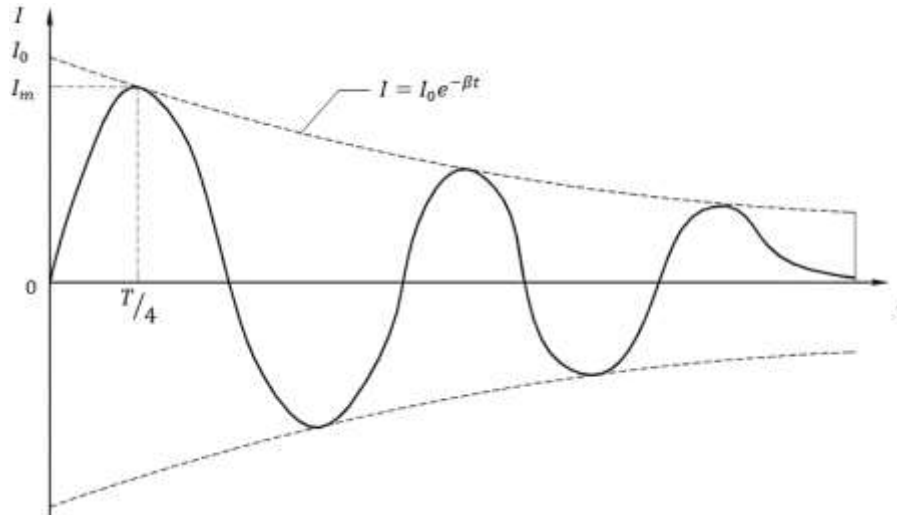


Рис. 4. Затухающие колебания тока

При разряде конденсаторной батареи колебательный процесс начинается при нулевом значении тока, поэтому амплитудное значение тока не позволяет определить начальную запасенную конденсаторной батареей энергию, так как часть ее перейдет в тепловую энергию на активном сопротивлении. Начальная энергия контура может быть вычислена через некое фиктивное значение тока I_0 , которое назовем «стартовым»:

$$I_0 = I e^{-\beta t},$$

где

$$t = \frac{T}{4}. \quad (13)$$

В этом случае энергия батареи будет определяться следующим выражением:

$$W = \frac{I_0^2 L}{2} = \frac{U_m C}{2}. \quad (14)$$

Необходимый уровень зарядки конденсаторов можно определить как

$$U_m = \sqrt{\frac{I_0^2 L}{C}}. \quad (15)$$

Из зависимости (10) получаем:

$$\tau_f^2 = \frac{1,04}{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} = \frac{1,04}{\frac{4L - CR^2}{4CL^2}},$$

$$4CL^2 \cdot 1,04 = \tau_f^2 (4L - CR^2),$$

$$C = \frac{4\tau_f^2 L}{4,16L^2 + R^2 \tau_f^2}. \quad (16)$$

Заряд, переносимый в импульсе, вычисляется по формуле

$$Q_\varepsilon = U_m C_\varepsilon \quad (17)$$

ОЦЕНИВАНИЕ ПРОЕКТНЫХ ПАРАМЕТРОВ БЛОКА КОНДЕНСАТОРНЫХ БАТАРЕЙ

Компонента A токового импульса

Для проектного расчета параметров конденсаторной батареи ГИТ значения индуктивности и активного сопротивления взяты, как и у ГИТ УИТОМ-1 [3], но с резким увеличением скорости нарастания тока:

$$I_m = 200 \text{ кА}, \quad \tau_f = 3 \text{ мкс}, \quad R = 0,1 \text{ Ом}, \quad L = 1 \text{ мкГн}.$$

Расчеты, по приведенным выше аналитическим зависимостям, дали следующие результаты:

- необходимая емкость конденсаторной батареи 8,47 мкФ;
- стартовый ток 252 кА;
- начальная энергия батареи 31752 Дж;
- необходимый уровень зарядки конденсаторной батареи 86,6 кВ.

Для определения проектных параметров конденсаторной батареи, которые обеспечат заданную амплитуду тока и его передний фронт, необходимо предусмотреть запас по максимально допустимому напряжению около 30%. Поэтому в батарее целесообразно применить последовательное соединение двух конденсаторов типа КПИ-63-3 [5]. Один такой блок должен обеспечить:

$$U_m = 86,6 \text{ кВ}, \quad C_\varepsilon = 1,5 \text{ мкФ}.$$

Параллельное соединение шести блоков (рис. 5) будет обладать емкостью 9 мкФ, а заряд, переносимый ими в импульсе, составит $Q_\varepsilon = 0,78 \text{ Кл}$. На рис. 6 показан разряд данного ГИТ в сравнении с заданным токовым импульсом.

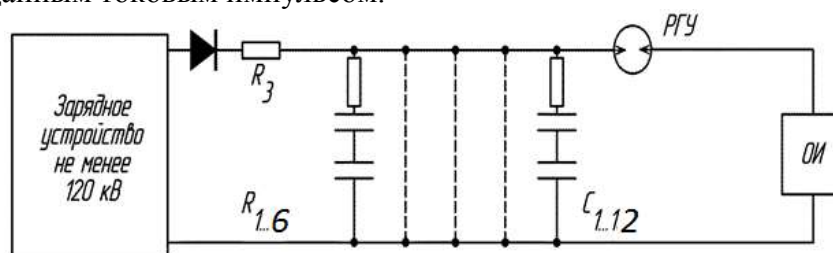


Рис. 5. Блок-схема ГИТ-А1:

$C_{1..16}$ – конденсаторы КПИ-63-3; $R_{1..8}$ – балластные сопротивления; РГУ – разрядник газовый управляемый; Д – диод высоковольтный; R_3 – зарядное сопротивление; ОИ – объект испытаний

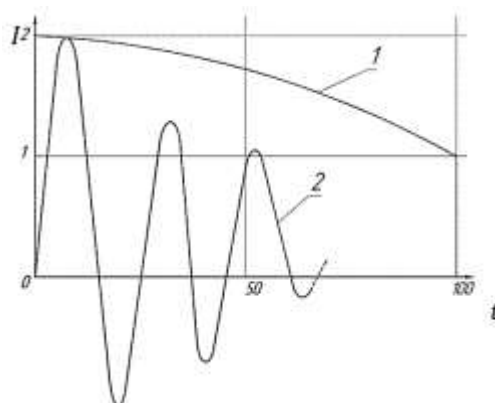


Рис. 6. Вид токового импульса:

1 – токовый импульс заданный; 2 – токовый импульс расчетный

Как видно из рис. 6, требуемые фронт и амплитуда импульса достигаются, однако необходимо поддержание токовой кривой в течение заданного интервала времени, причем с переносом электрического заряда, равного порядка 15 Кл:

$$Q = \int_0^{t=100\text{мкс}} Idt . \quad (18)$$

Для обеспечения данного токового интеграла требуется дополнительный ГИТ (ГИТ-А2), обладающий указанными свойствами. Таким образом, заданный токовый импульс предлагается воспроизвести комбинацией двух импульсов тока так, как это показано на рис. 7.

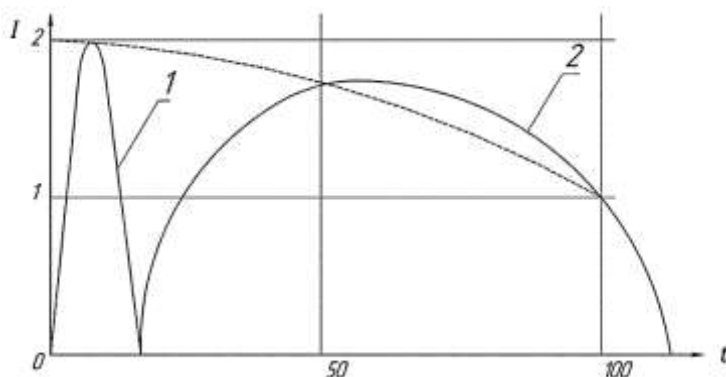


Рис. 7. Вид «комбинированного» импульса, имитирующего компоненту А:
1 – разряд ГИТ-А1; 2 – разряд ГИТ-А2

Расчет параметров ГИТ-А2 проведен для следующих значений токового импульса: $I_m = 150$ кА, $\tau_f = 40$ мкс, $R = 0,1$ Ом, $L = 4$ мкГн (введена дополнительная индуктивность). В результате определены следующие параметры ГИТ-А2:

- необходимая емкость конденсаторной батареи 310 мкФ;
- предельный ток 324 кА;
- энергия зарядки контура 209,9 кДж;
- уровень зарядки батареи конденсаторов 36,8 кВ.

По уровню зарядки может быть применен конденсатор типа КПИ-50-6,9 с номинальными характеристиками: $C = 6,9$ мкФ, $L = 85$ нГн, $I_m = 100$ кА, $U_m = 50$ кВ, $m = 31$ кг. Для получения заданной емкости конденсаторы собираются в батарею из 45 штук с параллельным подключением. Блок-схема ГИТ-А2 приведена на рис. 8.

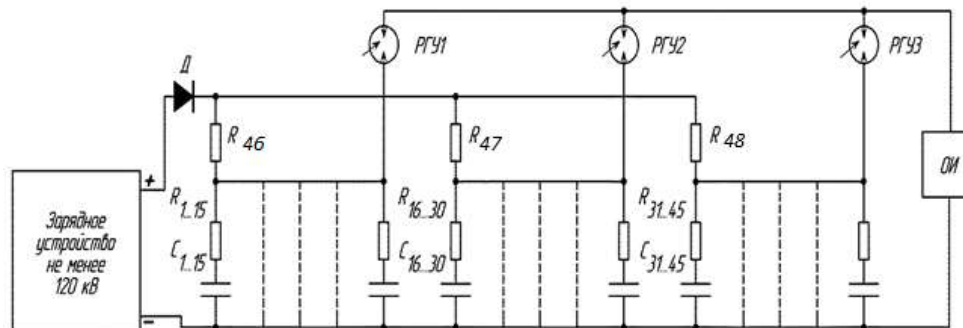


Рис. 8. Блок-схема ГИТ-А2:

- $C_{1...45}$ – конденсаторы КПИ-50-6,9; $R_{1...45}$ – балластные сопротивления;
 $РГУ1, РГУ2, РГУ3$ – разрядники газовые управляемые;
 $R_{46...48}$ – зарядные сопротивления; Д – диод высоковольтный; ОИ – объект испытаний

Компонента C токового импульса

Поскольку компонента B не вносит существенного вклада ни в динамику, ни в энергетику процесса она не воспроизводится.

Компонента C квазипостоянного тока должна обеспечивать перенос электрического заряда 200 Кл при продолжительности разряда от 0,2 до 1,0 с, поддержание уровня тока в диапазоне от 200 до 1000 А и горение устойчивой электрической дуги длиной порядка 50 мм при проведении испытаний сильным током.

В ГИТ-С УИТОМ-1 [3] данная компонента обеспечивается батареей, состоящей из 324 конденсаторов с параметрами:

$$C = 140 \text{ мкФ}, C_{\varepsilon} = 45 \text{ мкФ}, U_m = 5 \text{ кВ}.$$

Эта батарея обеспечивает электрический заряд 226,8 Кл.

При использовании более современных конденсаторов (типа КПИ-4-900 [5]) такой заряд можно обеспечить батареей из 64 конденсаторов. При этом

$$Q = 230,4 \text{ Кл}, U_m = 4 \text{ кВ}, m = 42 \text{ кг}.$$

Для обеспечения достаточного ресурса конденсаторов напряжение зарядки U_0 целесообразно ограничить 75% от максимально допустимого, т. е. 3 кВ. Эта величина амплитуды тока обеспечивается за счет введения в контур дополнительного дроссельного сопротивления. При амплитуде тока I_0 , равной 750 А (предписанный уровень от 200 до 1000 А), общее активное сопротивление цепи составит 4 Ом. Потребная емкость конденсаторной батареи в соответствии с (17) будет равна 0,076 Ф.

Итак, при использовании конденсаторов типа КПИ-4-900 батарея будет состоять из 64 конденсаторов и по своим массогабаритным характеристикам ГИТ-С ожидается самым крупным.

Оценка времени разряда батареи показывает, что заряд в 200 Кл должен быть выдан за время от 0,25 до 1,00 с. Время, необходимое для отдачи батареей конденсаторов электрического заряда в 200 Кл при общем заряде 230 Кл, составит:

$$Q = Q_0 e^{-\frac{t}{RC}},$$

$$\ln \frac{Q}{Q_0} = -\frac{t}{RC},$$

$$t = -RC \ln \frac{Q}{Q_0} = -4 \cdot 0,076 \cdot \ln \frac{30}{230} = 0,62,$$

что соответствует требованиям руководящих документов.

Блок-схема ГИТ-С приведена на рис. 9.

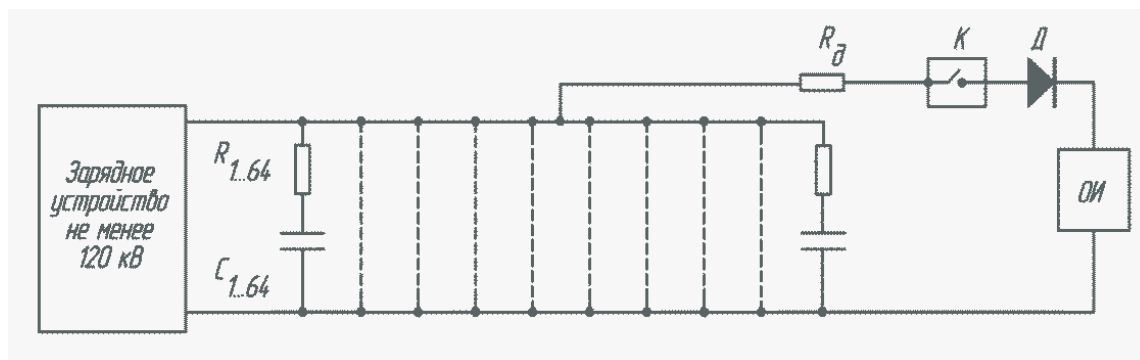


Рис. 9. Блок-схема ГИТ-С:

$C_{1..64}$ – конденсаторы КПИ-4-900; $R_{1..64}$ – балластные сопротивления; K – контактор;

D – диод высоковольтный; R_{∂} – резистор дроссельный;

ОИ – объект испытаний

Поскольку ГИТ-С получается достаточно громоздким, могут быть рассмотрены другие способы реализации компоненты C , например, с помощью аккумуляторной батареи.

Компонента D токового импульса

Токовый импульс D имеет крутой фронт нарастания импульса и значительную амплитуду. Поэтому по аналогии с компонентой A будет формироваться из двух составляющих ГИТ-D1 и ГИТ-D2.

Для ГИТ-D1 при $I_m = 100$ кА, $\tau_f = 0,2$ мкс, $R = 0,1$ Ом, $L = 1$ мкГн по зависимостям (16) и (13) $C = 0,039$ мкФ, $t = 0,308 \cdot 10^{-6}$ с; $\beta = 5000$; $I_0 = 101,5$ кА, т. е. колебания тока малозатухающие. В соответствии с (15) U_m составит 500 кВ.

С учетом коэффициента запаса 0,7 напряжение зарядки составит порядка 700 кВ. Соответствующий импульс может обеспечить только ГИТ. При обеспечении импульса тока с таким градиентом ГИТ-D1 вырождается в ГИТ, дающий очень крутой и короткий импульс. Десять высоковольтных конденсаторов объединяются в генератор Аркадьева – Маркса с переключением параллельно-последовательно. Блок-схема ГИТ-D1 приведена на рис. 10.

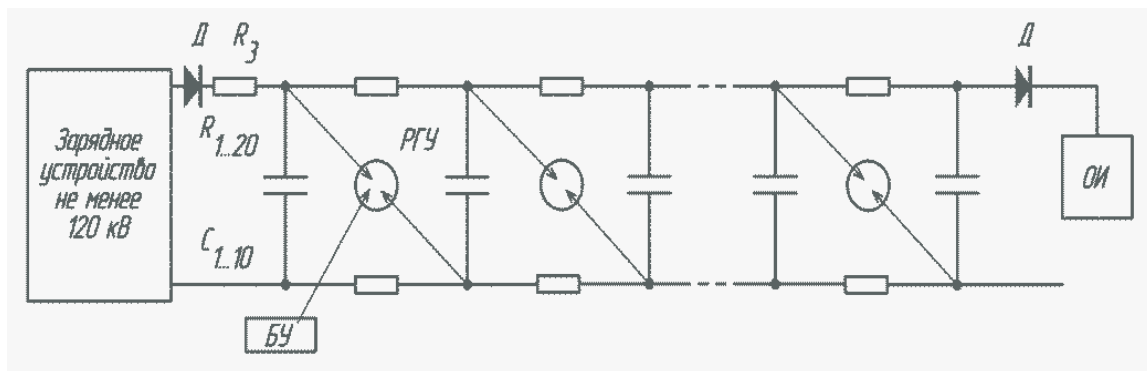


Рис. 10. Блок-схема ГИТ-D1:

$C_{1...10}$ – конденсаторы КПИ-100-04; $R_{1...20}$ – балластные сопротивления;

БУ – блок управления; РГУ – разрядник газовый управляемый;

ОИ – объект испытаний

Заданная длительность импульса может быть обеспечена дополнительным ГИТ-D2 с примерными параметрами полуволны тока: $I_m = 75$ кА, $\tau_f = 20$ мкс, $R = 0,1$ Ом, $L = 3$ мкГн (введена дополнительная индуктивность).

Тогда с учетом вычислений по формулам (12)–(16) получим следующие параметры:

- необходимая емкость конденсаторной батареи 116 мкФ;
- коэффициент затухания β 16667;
- стартовый ток I_0 125,4 кА;
- энергия зарядки контура 23,6 кДж;
- напряжение зарядки батареи конденсаторов 20,1 кВ.

Данную конденсаторную батарею целесообразно собрать из конденсаторов КПИ-50-6,9, которые используются в ГИТ-A2. По условиям обеспечения необходимой емкости контура он будет состоять из шести параллельно соединенных конденсаторов. Блок-схема ГИТ-D2 приведена на рис. 11.

На рис. 12 приведен общий вид токового импульса, обеспечиваемый комплектом из пяти ГИТ. Коммутация отдельных компонент импульса должна быть обеспечена автоматической системой управления.

Основные ожидаемые характеристики ГИТ в целом приведены в табл. 1.

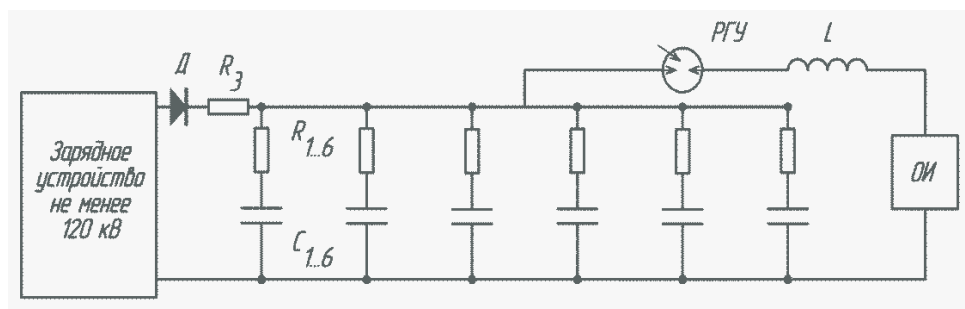


Рис. 11. Блок-схема ГИТ-D2:

$C_{1..6}$ – конденсаторы КПИ-50-6,9; $R_{1..6}$ – балластные сопротивления; РГУ – разрядник газовый управляемый; L – добавочная индуктивность; R_3 – зарядное сопротивление; Д – диод высоковольтный

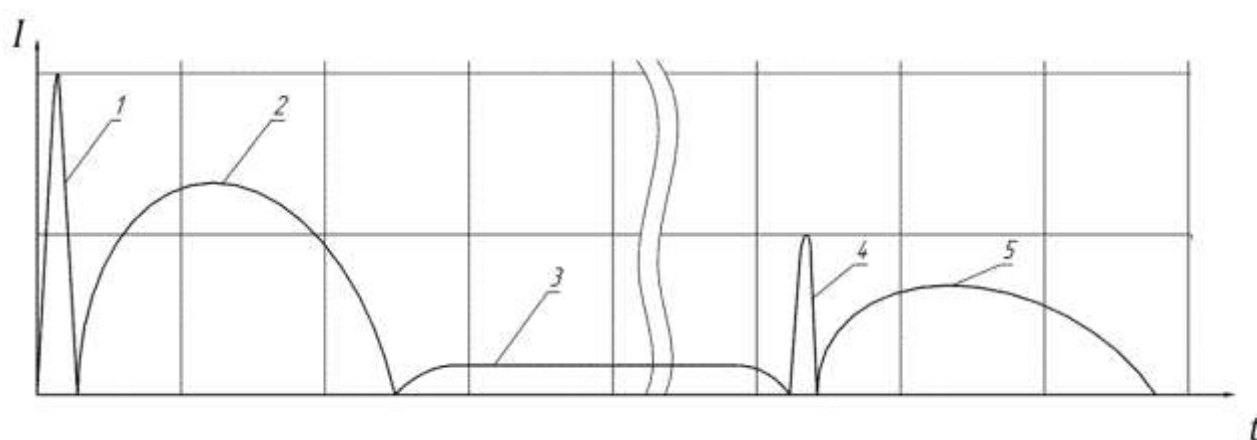


Рис. 12. Вид токового импульса, реализуемого с помощью предлагаемого комплекта оборудования:

1 – разряд ГИТ-A1; 2 – разряд ГИТ-A2; 3 – разряд ГИТ-C; 4 – разряд ГИТ-D1; 5 – разряд ГИТ-D2

Таблица 1

Характеристики ГИТ

Обозначение ГИТ	τ_f , мкс	I_m , кА	U_m , кВ	C, мкФ	Тип и количество конденсаторов
ГИТ-A1	3	200	86,6	9	КПИ-63-3; 12 штук
ГИТ-A2	40	150	50	310	КПИ-50-6,9; 45 штук
ГИТ-C	–	0,2 – 1,0	4	76000	КПИ-4-900; 64 штуки
ГИТ-D1	0,2	100	700	0,04	КПИ-100-0,4; 10 штук
ГИТ-D2	20	75	20,1	116	КПИ-50-6,9; 6 штук

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТОКОВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Для проверки и уточнения проектных расчетов выполнено моделирование процессов, происходящих в синтезированных электрических цепях. Результаты математического моделирования показывают, что проектные параметры выбраны правильно, значения амплитуды тока и фронт его нарастания обеспечены. Конструкция ГИТ должна обеспечить срезание отрицательных значений токовой компоненты.

Результаты математического моделирования для ГИТ-А1, ГИТ-А2, ГИТ-Д1 и ГИТ-Д2 показаны на рис. 13–16.

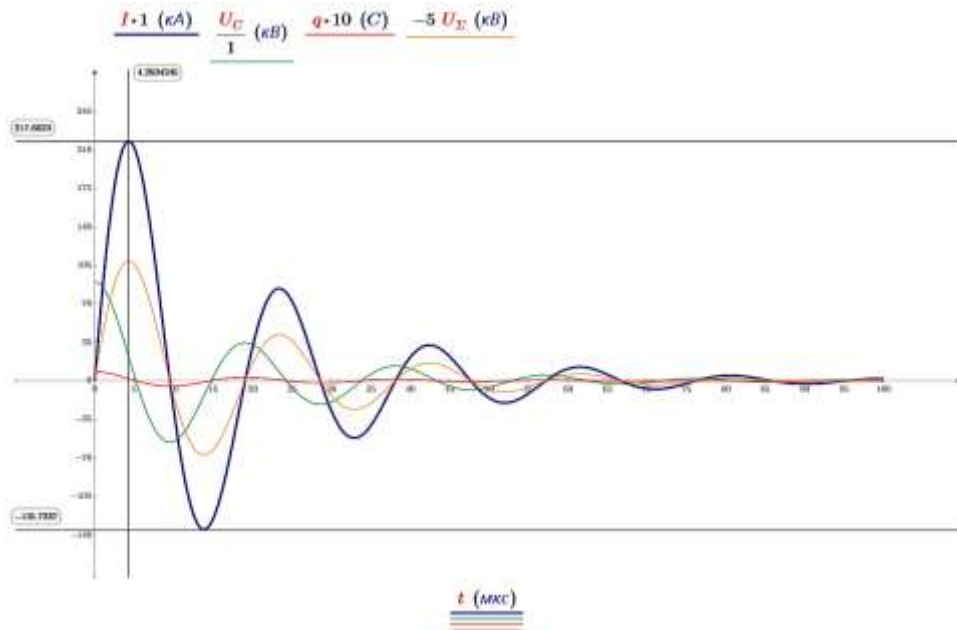


Рис. 13. График зависимости разряда ГИТ-А1 на расчетную нагрузку.

Расчеты выполнены для ГИТ-А1 при следующих параметрах:

$$U_m = 90 \text{ кВ}, L = 1 \text{ мкГн}, R = 0,1 \text{ Ом}, C = 9,0 \text{ мкФ}.$$

$$\text{Получено, что } I_{\max} = 217,6 \text{ кА}, \tau_f = 2,8 \text{ мкс}$$

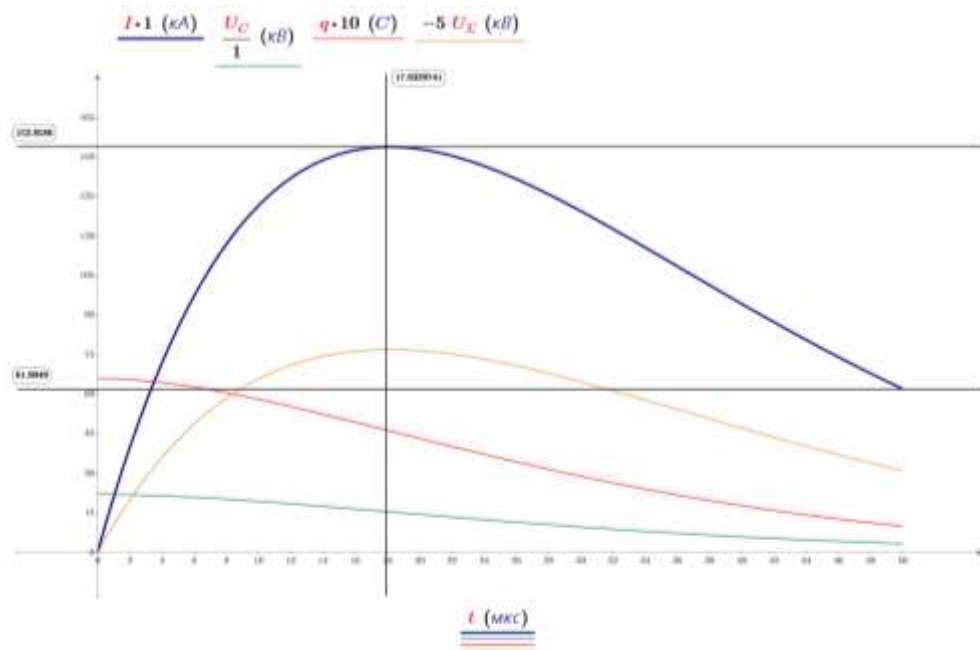


Рис. 14. График зависимости разряда ГИТ-А2 на расчетную нагрузку.

Расчеты проводились для параметров: $U_m = 22 \text{ кВ}, L = 1 \text{ мкГн}, R = 0,1 \text{ Ом}, C = 300 \text{ мкФ}.$

$$\text{Получено: } I_{\max} = 153,8 \text{ кА}, \tau_f = 46 \text{ мкс}$$

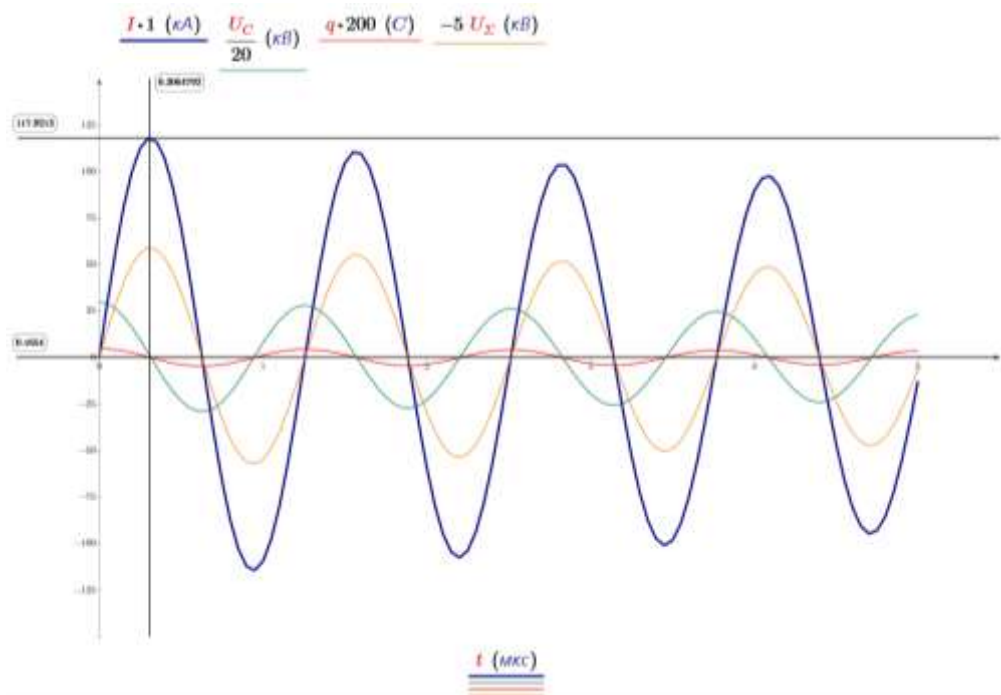


Рис. 15. График зависимости разряда ГИТ-D1 на расчетную нагрузку. Расчеты проводились для параметров: $U_m = 600 \text{ кВ}$, $L = 1 \text{ мкГн}$, $R = 0,1 \text{ Ом}$, $C = 0,04 \text{ мкФ}$.

Получено: $I_{\max} = 117,9 \text{ кА}$, $\tau_f = 0,2 \text{ мкс}$

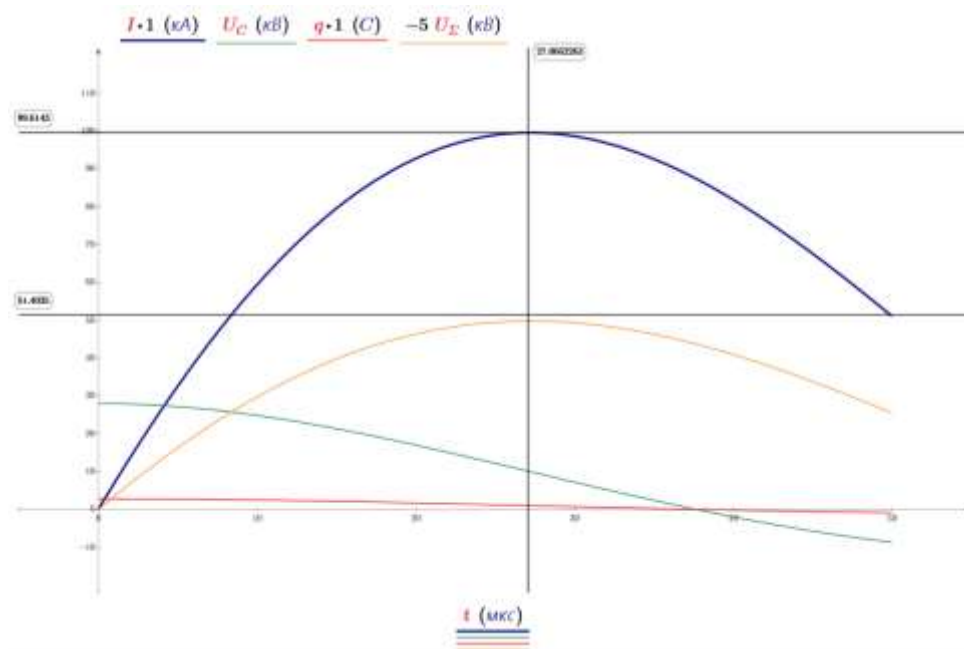


Рис. 16. График зависимости разряда ГИТ-D2 на расчетную нагрузку. Расчеты проводились для параметров: $U_m = 28 \text{ кВ}$, $L = 4 \text{ мкГн}$, $R = 0,1 \text{ Ом}$,

$C = 100 \text{ мкФ}$. Получено: $I_{\max} = 99,6 \text{ кА}$, $\tau_f = 50 \text{ мкс}$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показали выполненные проектные расчеты, выбранные источники импульсного напряжения на базе конденсаторов типа КПИ теоретически могут обеспечить заданные КТ-160D (G) и другими документами параметры по амплитуде тока, фронтам нарастания импульсов тока и продолжительности импульса.

В то же время компоненты *A* и *D* обеспечиваются при применении комбинированного импульса, создаваемого двумя отдельными ГИТ, подключение которых должно обеспечиваться системой управления. Обеспечение переднего фронта компоненты *D*, имеющего скорость нарастания тока $3,2 \cdot 10^{11}$ А/с, требует применения источника тока с напряжением от 500 до 700 кВ, что создает достаточно сложные технические проблемы при испытаниях сильными токами.

Список используемых источников

1. Молния ударила в ракету «Союз» при старте с Плесецка. 27 мая 2019. – URL: <https://tass.ru/proisshestiya/6475178> (дата обращения: 18.01.2021).
2. КТ-160D. Квалификационные требования РФ. Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования. Требования, нормы и методы испытаний. – М.: Госстандарт РФ, 2004.
3. Баранов М. И., Буряковский С. Г., Рудаков С. В. Инструментальное обеспечение в Украине натурных испытаний объектов энергетики, авиационной и ракетно-космической техники на стойкость к воздействию импульсного тока искусственной молнии // *Електротехніка і Електромеханіка*. – 2018. – № 4. – С. 45–53.
4. Батура М. П., Кузнецов А. П., Курулев А. П. Теория электрических цепей. – Минск: Высшая школа, 2015. – 606 с.
5. Технические характеристики импульсных конденсаторов высокой удельной энергии // Русская технологическая группа. – URL: http://www.rustechgroup.ru/rus/ik_table.htm (дата обращения: 02.06.2021).

А. Н. Дьяков,
кандидат технических наук, доцент;
А. С. Кокарев,
кандидат технических наук;
А. А. Левчук,
кандидат технических наук;
А. С. Орлов,
кандидат технических наук

МОДЕЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ПРОСТРАНСТВЕННО РАСПРЕДЕЛЕННОГО ОБЪЕКТА ЭКСПЛУАТАЦИИ

В статье представлена постановка задачи моделирования технического обслуживания и ремонта территориально распределенного комплекса с целью исследования влияния на коэффициент готовности объекта эксплуатации структуры пространственного размещения его составных частей и баз снабжения, под которыми в статье понимается место временного размещения ремонтного персонала и типовых элементов замены. Описана информационная модель взаимодействия элементов комплекса и системы его технического обслуживания и ремонта в части обеспечения оперативного прибытия ремонтного персонала и типовых элементов замены на объекты эксплуатации. Предложено описание состояний элементов модели. Разработан алгоритм формирования планов сервисного обслуживания по критерию минимума периода неработоспособности объектов эксплуатации. Модель реализована в виде программы для ЭВМ (консольное приложение), показаны результаты экспериментальной отработки модели и предложены направления ее практического применения.

Ключевые слова: разностные уравнения, сервисное обслуживание, модели с дискретным временем, алгоритмическое описание изменения состояния системы, удаленные базы снабжения.

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость решения известной задачи оптимального распределения запасов возникает при эксплуатации объектов специального назначения, ключевыми показателями эффективности функционирования которых являются не ресурсные, а тактико-технические показатели. Так, кроме степени достижения целевых и обеспечивающих характеристик, заказчиком оценивается обоснованность расходов, требуемых для эксплуатации таких образцов вооружения. В случае обоснования ресурсоемкости эксплуатации пространственно распределенных объектов эксплуатации (ПРОЭ) задача еще более усложняется особенностями функционирования системы поставок запасных частей и системы технического обслуживания и ремонта. Составные элементы объектов эксплуатации такого типа (далее – ОЭ) могут быть территориально разнесены на значительные расстояния (рис. 1), что, несомненно, оказывает существенное влияние на коэффициент готовности таких комплексов и на величину эксплуатационных затрат. В ряде случаев формирование запаса материальных средств, необходимых для восстановления работоспособности ОЭ при возникновении отказов или сервисном обслуживании, непосредственно в войсковой части нецелесообразно. В этой ситуации перед

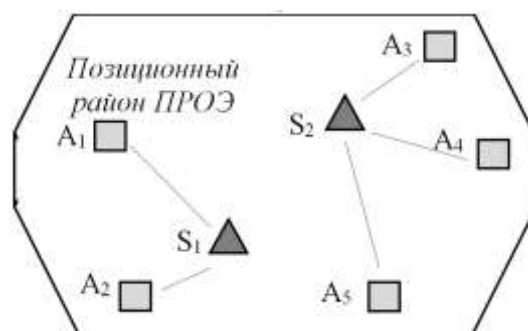


Рис 1. Вариант структуры пространственно распределенного объекта эксплуатации:
 □ – ОЭ (источники отказов);
 ▲ – базы снабжения;
 — — — — — путь снабжения ОЭ

разработчиком при создании ПРОЭ и его системы эксплуатации стоят задачи обоснования минимально необходимого числа баз снабжения (БС) ОЭ, а также определения связей ОЭ с БС. Перед эксплуатирующей организацией стоит задача оценивания эффективности функционирования системы эксплуатации (в части предстоящего сервисного обслуживания), а также систематическое уточнение плана снабжения ОЭ (фактически – определение сроков и последовательности сервисного обслуживания БС объектов эксплуатации) материальными запасами.

Особую сложность представляют планирование и организация сервисного обслуживания элементов ОЭ, предусматривающих единовременную «залповую» замену множества типовых элементов, неисправность которых может быть выявлена только при очередном техническом обслуживании. К объектам эксплуатации с такими особенностями обслуживания относятся, например, современные радиолокационные станции высокой заводской готовности системы предупреждения о ракетном нападении. Очевидно, что в случае несвоевременного обслуживания или замены таких элементов возникает риск невозможности выполнения ПРОЭ поставленной задачи и, как следствие, увеличения периода его неработоспособности, а значит – снижения вероятности успешного решения задач. И наоборот, излишне заблаговременная их замена влечет недорасход ресурса, а значит увеличиваются эксплуатационные затраты на функционирование ПРОЭ в целом. Оптимальным в смысле готовности и ресурсоемкости объекта эксплуатации в этом случае считается такая организация процесса его сервисного обслуживания, которая позволяет при имеющихся исходных данных обеспечить, прежде всего, минимальный период неработоспособности каждого элемента ПРОЭ, а затем – минимальную ресурсоемкость процесса поддержания готовности.

Для решения таких задач необходимы соответствующие модели функционирования ПРОЭ, учитывающие специфику их применения, а также ограничения, обусловленные оперативностью выполняемых задач. На практике, однако, формирование планов сервисного обслуживания осуществляется эмпирически, на основе имеющегося опыта лица, принимающего решения (ЛПР). Как следствие, корректность такого плана, а значит, и вероятность успешного решения задач объектом эксплуатации, зависит от квалификации ЛПР, что не исключает ошибок планирования и «человеческого фактора» в принятии решений. Кроме того, отсутствует возможность оценить, насколько то или иное решение, изменение плана или даже структуры ПРОЭ повлияет на эффективность его функционирования без непосредственной реализации такого решения.

В статье поставлена и решена задача разработки модели процесса функционирования ПРОЭ с учетом потребности в плановом и экстренном сервисном обслуживании его элементов и параметров его территориального размещения. Модель реализована в виде программы для ЭВМ, что облегчает ее практическое использование при планировании эксплуатационных процессов территориально-распределенных объектов эксплуатации, оценке ресурсоемкости таких процессов и дальнейшем совершенствовании научно-методического аппарата обоснования мероприятий технического обслуживания и ремонта сложных технических систем.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть заданы состав Q ПРОЭ, расстояния T между его элементами и БС и интенсивности отказов Λ элементов, подлежащих сервисному обслуживанию (ремонту).

Примем следующие обозначения: I и J – количество ОЭ и БС соответственно; $i \in \overline{1, I}$, $j \in \overline{1, J}$ – порядковый номер ОЭ и БС соответственно; t_i^{HP} – период неработоспособности i -го ОЭ в течение заданного периода функционирования t^* ; S_i и W_j – параметры состояния ОЭ и БС соответственно.

Тогда функционирование всего комплекса ПРОЭ можно представить в виде набора состояний составляющих его элементов $S_1...S_I, W_1...W_J$ в каждый момент времени $0 \leq \tau \leq t^*$ и функции преобразования этих состояний в управляющие воздействия $S'_i = F(W_1, \dots, W_J), W'_j = F(S_1, \dots, S_I)$ (рис. 2), а задача моделирования процесса функционирования ПРОЭ в этом случае сводится к нахождению зависимости длительностей периодов неработоспособности каждого ОЭ от исходных данных Q, T и Λ за период t^* .

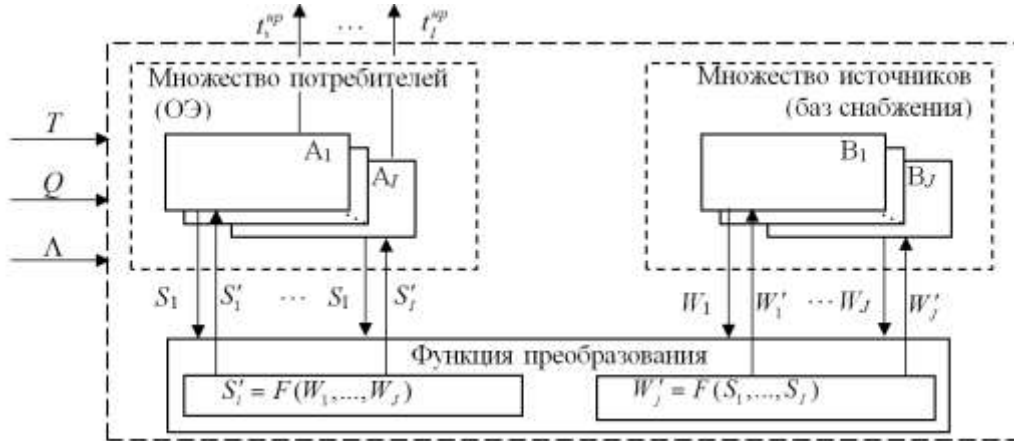


Рис 2. Информационная модель функционирования ПРОЭ

Дано:

$$Q = \langle Q_1, Q_2, \dots, Q_i, \dots, Q_I \rangle$$

– кортеж, каждый элемент которого характеризует сменные элементы i -го ОЭ;

$$Q_i = \langle h_i, n_i \rangle, \text{ где } h_i \in \mathbb{N} \text{ и } n_i \in \mathbb{N}$$

– соответственно номенклатура и количество батарей в составе i -го ОЭ;

$$\Lambda = \langle \Lambda_1, \Lambda_2, \dots, \Lambda_g, \dots, \Lambda_G \rangle$$

– кортеж характеристик надежности обслуживаемых элементов ОЭ;

$$\Lambda_g = \langle \lambda_g, t_g^{\text{срсл}} \rangle, \text{ где } \lambda_g \in \mathbb{Q} \text{ и } t_g^{\text{срсл}} \in \mathbb{N}$$

– интенсивности отказов и назначенный срок службы обслуживаемых элементов g -го типа;

$$T = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & \dots & t_{1I} & \dots & t_{1(I+J)} \\ t_{21} & t_{22} & \dots & t_{2I} & \dots & t_{2(I+J)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ t_{I1} & t_{I2} & \dots & t_{II} & \dots & t_{I(I+J)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ t_{(I+J)1} & t_{(I+J)2} & \dots & t_{(I+J)I} & \dots & t_{(I+J)(I+J)} \end{bmatrix}$$

– матрица длительностей прохождения пути (в часах) между позициями ОЭ и баз снабжения

Найти: для $\forall i \in I$ период неработоспособности каждого i -го ОЭ, для чего построить зависимость $t_i^{\text{HP}} = f(T, Q, \Lambda, t^*)$, где t^* – рассматриваемый период эксплуатации ПРОЭ.

Получение прямой математической зависимости выходных параметров исследуемого объекта от известных данных представляет существенную сложность ввиду взаимовлияния характеристик входящих в его состав элементов, зависимости их состояния от случайных факторов и исследуемого временного периода их функционирования.

В общей теории систем доказано [1], что большинство систем могут быть декомпозированы на базовые представления подсистем и математически описаны, что позволяет вычислить (на основе задания критериев, ограничений, априорной информации) те характеристики исследуемой сложной системы, которые существенны в решаемой научной задаче. Таким обра-

зом, решение поставленной задачи может быть основано на иерархической процедуре расчленения информационной модели ПРОЭ до тех пор, пока в дальнейшей декомпозиции не будет необходимости.

Поскольку, как выше уже отмечалось, мы представляем ПРОЭ в виде набора состояний составляющих его элементов в каждый момент времени τ (т. е. в виде динамической системы с дискретным временем), наиболее целесообразно описывать изменение этих состояний системой разностных уравнений с переменной τ , описывающих текущее состояние системы $\Psi(\tau)$ с учетом предыдущего состояния $\Psi(\tau-1)$. Такой подход показал свою практическую применимость для решения подобных задач [1–4].

МОДЕЛЬ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТА ЭКСПЛУАТАЦИИ

Пусть ОЭ функционально состоит из N_i параллельно соединенных обслуживаемых элементов (ОбЭ) (рис. 3). Структурно-функциональная схема такого типа получила широкое распространение, например, в современных радиолокационных станциях системы предупреждения о ракетном нападении, мобильных противоракетных и противокосмических комплексах и пр. Отказ любого (или сразу нескольких) из них пропорционально увеличивает вероятность отказа всего ОЭ в течение времени t^* . С целью упрощения описания системы будем считать, что ОЭ неработоспособен в случае выхода из строя более N_i^o ОбЭ, $N_i^o \in \overline{0, N_i}$.

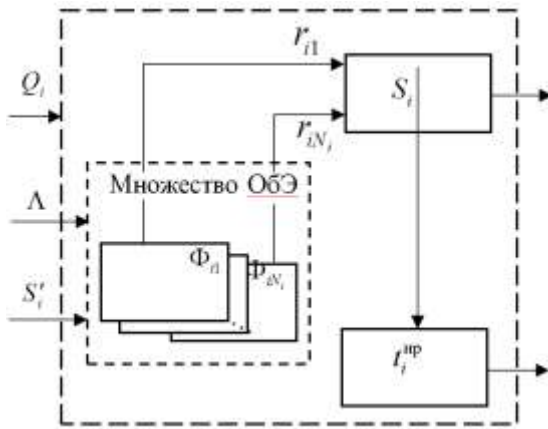


Рис. 3. Информационная модель изменения технического состояния ОЭ

Пусть r_{ik} – остаточный ресурс k -го ОбЭ i -го ОЭ; $k \in \overline{1, N_i}$. Тогда характеристикой S_i , описывающей состояние ОЭ, можно считать срок, оставшийся до истечения срока службы не менее чем N_i^o ОбЭ, т. е. перехода ОЭ в неработоспособное состояние:

$$S_i = \begin{cases} 0, & \text{при } \sum_{k=1}^{N_i} v_{ik} \geq N_i^o, \\ \min(r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{ik}, \dots, r_{iN_i}) | r_{ik} > 0, & \end{cases}$$

где v_{ik} – признак неработоспособности k -го ОбЭ i -го ОЭ, $v_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{при } r_{ik} = 0, \\ 0 & \end{cases}$.

Очевидно, что целевой параметр t_i^{np} в этом случае описывается системой разностных уравнений:

$$t_i^{\text{np}}(\tau) = \begin{cases} t_i^{\text{np}}(\tau-1) + 1, & \text{при } S_i = 0, \\ t_i^{\text{np}}(\tau-1), & \end{cases}$$

которая будет использована далее в качестве модели изменения технического состояния ОЭ.

ФУНКЦИЯ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ОБСЛУЖИВАЕМОГО ЭЛЕМЕНТА

Пусть t_{ik}^H и $t_{ik}^{срсл}$ – текущая наработка и предельный сроки службы k -го ОбЭ i -го ОЭ соответственно, а каждому ОбЭ g -го типа однозначно соответствует заданный предельный срок службы $t_g^{срсл}$, т. е. $t_{ik}^{срсл} = t_g^{срсл}$. Поскольку, по условию задачи, функционирование ОбЭ при достижении предельного срока службы невозможно, очевидно, что $t_{ik}^H \leq t_{ik}^{срсл}$. Замена ОбЭ (фактически – восстановление ресурса) происходит по сигналу обратной связи S_i' . Тогда изменение наработки ОбЭ вычисляется как

$$t_{ik}^H(\tau) = \begin{cases} 0, & \text{при } \tau = 0, \\ t_{ik}^H(\tau-1) + 1, & \text{при } r_{ik}(\tau-1) > 0, \\ 0, & \text{при } S_i' = 1, \\ t_{ik}^H(\tau-1), & \end{cases}$$

а остаточный ресурс ОбЭ, характеризующий состояние ОбЭ в момент τ , составляет $r_{ik}(\tau) = t_{ik}^{срсл} - t_{ik}^H(\tau)$.

Допустим, в процессе эксплуатации возможны внезапные отказы с известной интенсивностью λ_{ig} , поток отказов простейший, т. е. вероятность отказа k -го ОбЭ описывается зависимостью $e^{-\lambda_{ig} t_{ik}^H}$.

Пусть x – случайное вещественное число из диапазона $[0,1]$, распределенное по равномерному закону. Тогда факт случайного отказа k -го ОбЭ можно представить в виде бинарного значения

$$\hat{O}_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{при } x \geq e^{-\lambda_{ig} t_{ik}^H}, \\ 0, & \end{cases}$$

а зависимость изменения периода времени, оставшегося до истечения назначенного срока службы k -го ОбЭ i -го ОЭ, с учетом возможного отказа, примет вид

$$r_{ik}(\tau) = \begin{cases} 0, & \text{при } x \geq e^{-\lambda_{ig} t_{ik}^H}, \\ t_{ik}^{срсл} - t_{ik}^H(\tau). & \end{cases}$$

ФУНКЦИЯ ИЗМЕНЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ПОДВИЖНОЙ БАЗЫ СНАБЖЕНИЯ

Примем следующие обозначения: W_j – номер текущей позиции j -ой БС, $W_j \in \overline{1, I+J}$; W_j' – номер целевой позиции j -ой БС (номер ОЭ, на котором необходимо провести сервисное обслуживание), $W_j' \in \overline{1, I}$. В начальный момент времени $\tau = 0$ база находится в исходной позиции $W_j(0) = I + j$. При получении команды на проведение сервисного обслуживания (изменении значения W_j') БС достигает указанной позиции за время $t_{W_j, W_j'}$.

Тогда правило определения номера текущей позиции БС $W_j(\tau)$ в каждый момент времени τ можно описать в виде

$$W_j(\tau) = \begin{cases} W'_j, & \text{при } t'_j(\tau) = 0, \\ I + j, & \text{при } \tau = 0, \\ W_j(\tau - 1), & \end{cases}$$

где $t'_j(\tau)$ – время, оставшееся до прибытия БС в целевую позицию W'_j :

$$t'_j(\tau) = \begin{cases} t_{I+j, W'_j}, & \text{при } \tau = 0, \\ t'_j(\tau - 1), & \text{при } t'_j(\tau - 1) > 0, \\ 0, & \text{при } W_j(\tau - 1) = W'_j, \\ t_{W_j(\tau-1), W'_j}, & \end{cases}$$

Представленная выше зависимость описывает изменение местоположения подвижной БС относительно составных частей пространственно распределенного объекта эксплуатации, что в данном случае определяет интенсивность восстановления работоспособного состояния ОЭ.

ФУНКЦИЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОЭ В УПРАВЛЯЮЩИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

С целью обеспечения процесса функционирования элементов ПРОЭ и их взаимодействия должен быть реализован алгоритм, формирующий план обслуживания. Иными словами, в каждый момент времени информация о состоянии ОЭ и баз обслуживания должна быть преобразована во множество управляющих воздействий $S' = \langle S'_1, S'_2, \dots, S'_i, \dots, S'_I \rangle$ и $W' = \langle W'_1, W'_2, \dots, W'_j, \dots, W'_J \rangle$. В моделях изменения состояния ОбЭ и изменения местоположения БС мы определили информационный смысл таких воздействий: S'_i – признак факта проведения сервисного обслуживания на i -ом ОЭ, $S'_i \in \overline{0,1}$; W'_j – номер целевой позиции j -ой БС, $W'_j \in \overline{1, I+J}$.

Оставим за рамками данной статьи вопросы обоснования и подтверждения оптимальности такого алгоритма. Конкретная реализация такого преобразования может быть различной в зависимости от целей исследования, особенностей объекта эксплуатации, требований заказчика и т. д. В данной работе авторами применен эвристический алгоритм формирования плана обслуживания по критерию минимума периода неработоспособного состояния каждого ОЭ $t_i^{\text{нр}}$ (рис. 4), включающий в себя выполнение следующих операций.

1. Сортировка элементов множества S состояний ОЭ по возрастанию остаточного ресурса.

2. Формирование для каждой j -й БС очереди сервисного обслуживания ОЭ $\Omega = \langle \Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_j, \dots, \Omega_J \rangle$ посредством замены ОбЭ, где $\Omega_j = \langle \Omega_{j1}, \Omega_{j2}, \dots, \Omega_{jg}, \dots, \Omega_{jG} \rangle$ – очередь целей j -й БС; $0 \leq G \leq I$; $\Omega_{jg} = \langle N_{jg}^n, t_{jg}^n \rangle$; N_{jg}^n и t_{jg}^n – номер ОЭ (целевой позиции) и время выдачи сигнала на выезд БС соответственно.

2.1. Для каждого элемента упорядоченного множества S^* формируется множество Θ_i допустимых БС, расстояние от предыдущей позиции ξ_j которых до целевой позиции i минимальны, а время их прибытия не превышает S_i^* , т. е. $\forall i \in I$ сформировать $\Theta_i(S_i^*)$, где $\Theta_i = \{\theta_{i1}, \theta_{i2}, \dots, \theta_{iv}, \dots, \theta_{iV}\}$, $0 \leq V \leq J$:

$$\theta_{iv} = j \left| \begin{array}{l} t_{i,I+j} = \min(t_{i,I+1}, t_{i,I+2}, \dots, t_{i,I+J}) \\ \tau + t_{i,\xi_j} \leq S_i^* \end{array} \right.$$

2.2. При получении пустого множества Θ_i рассчитывается такой сдвиг влево во времени выезда БС t' , который позволит получить, по крайней мере, одну БС, удовлетворяющую ограничениям. Очевидно, что сдвиг t' должен удовлетворять условию $S_i^* - t' \geq \tau$.

2.3. При получении пустого множества Θ_i в случае $S_i^* - t' = \tau$ определяется такая БС, которая позволит обслужить ОЭ с наименьшей потерей длительности его работоспособного состояния, т. е.

$$\begin{aligned} \theta_{i1} &= j | t_j'' = \min(t_1'', t_2'', \dots, t_j'', \dots, t_j'') ; \\ t_j'' &= t_{j,|\Omega_j|}'' + t_{i,\xi_j} - t_j' - S_i^* ; \\ \xi_j &= \begin{cases} W_j, \text{ при } i = 1 \vee |\Omega_j| ; \\ N_{j,|\Omega_j|}'' \end{cases} \end{aligned}$$

3. Выдача каждой БС номера целевой позиции в соответствии с правилом

$$W_j'(\tau) = \begin{cases} j + I, \text{ при } |\Omega_j| = 0, \\ N_{j1}'' , \text{ при } t = t_{j1}'' , \\ j + I, \text{ при } \tau = 0, \\ W_j'(\tau - 1) \end{cases}$$

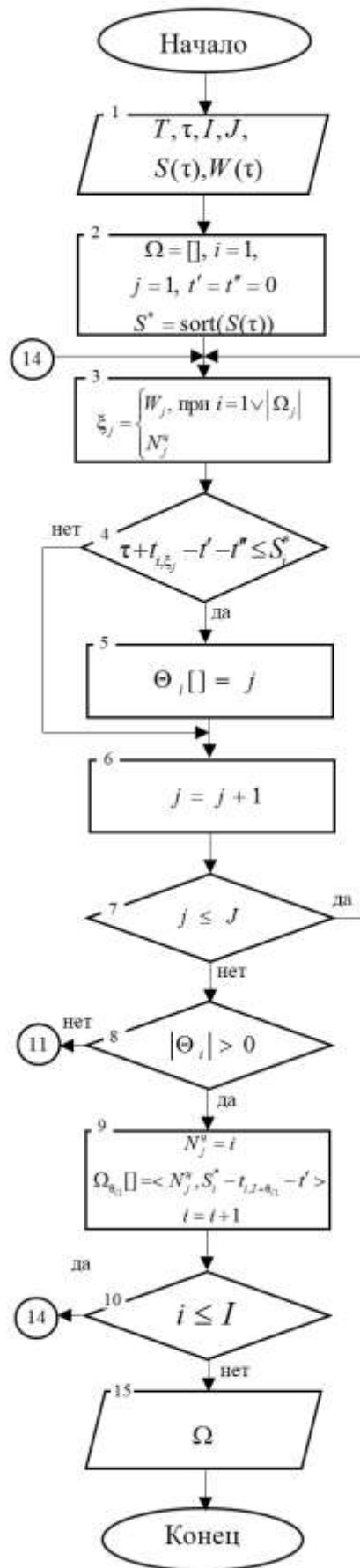
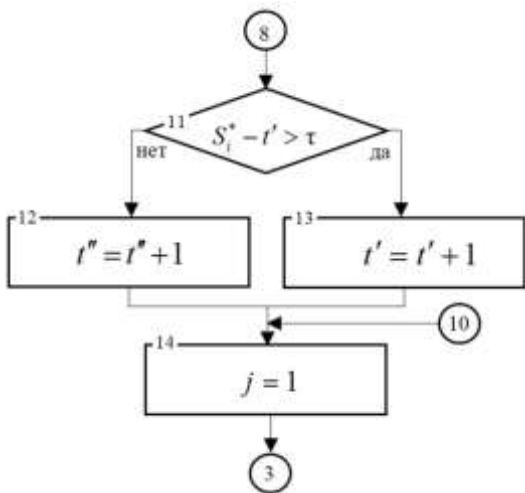


Рис. 4. Блок-схема алгоритма формирования плана обслуживания ОЭ

Предложенный алгоритм формирует план сервисного обслуживания, т. е. определяет такой порядок обслуживания базами снабжения каждого ОЭ, при котором их готовности будут максимальны при имеющейся структуре ПРОЭ и показателях надежности ОбЭ.

Алгоритм функционирования и взаимодействия всех элементов ПРОЭ в целом не представляет особого интереса и заключается в последовательном расчете приведенных выше соотношений в следующем порядке:

- 1) формирование состояния каждого ОбЭ на основе модели изменения состояния ОбЭ;
- 2) формирование состояния каждого ОЭ на основе модели изменения технического состояния ОЭ;
- 3) формирование состояния БС на основе модели изменения местоположения подвижной базы снабжения;
- 4) формирование управляющих воздействий на основе алгоритма формирования плана обслуживания ОЭ.

ПРИМЕР РЕАЛИЗАЦИИ МОДЕЛИ ПРОЭ

С целью проверки корректности предложенных математических моделей и практического исследования влияния структуры ПРОЭ на показатели готовности ОЭ разработанная модель технического обслуживания и ремонта пространственно распределенного объекта эксплуатации реализована в виде программы для ЭВМ [5].

```

Задан массив интенсивностей отказов блок
Задан ресурс для номенклатур
Задан массив расстояний
Старт моделирования...
49: Обслуживание СГЭП № 1
97: Обслуживание СГЭП № 2
121: Отказ СГЭП № 3
121: Отказ СГЭП № 4
145: Восстановление СГЭП № 3
171: Отказ СГЭП № 1
193: Восстановление СГЭП № 4
219: Отказ СГЭП № 2
267: Отказ СГЭП № 3
298: Восстановление СГЭП № 1
315: Отказ СГЭП № 4
338: Восстановление СГЭП № 2
380: Восстановление СГЭП № 3
412: Отказ СГЭП № 1
434: Восстановление СГЭП № 4
460: Отказ СГЭП № 2
508: Отказ СГЭП № 3
531: Восстановление СГЭП № 1
556: Отказ СГЭП № 4
579: Восстановление СГЭП № 2
627: Восстановление СГЭП № 3
653: Отказ СГЭП № 1
675: Восстановление СГЭП № 4
701: Отказ СГЭП № 2
749: Отказ СГЭП № 3
772: Восстановление СГЭП № 1
797: Отказ СГЭП № 4
820: Восстановление СГЭП № 2
868: Восстановление СГЭП № 3
894: Отказ СГЭП № 1
916: Восстановление СГЭП № 4
942: Отказ СГЭП № 2
990: Отказ СГЭП № 3
Моделирование завершено...
СГЭП №1: Kг=0,534
СГЭП №2: Kг=0,582
СГЭП №3: Kг=0,605
  
```

Рис. 5. Окно консольного приложения при моделировании

В качестве исходных данных принят ПРОЭ, состоящий из четырех равноудаленных друг от друга однотипных ОЭ. Вывод данных об изменении состояний ОЭ во времени осуществлялся в окне консольного приложения (рис. 5).

Достижение устойчивости результатов моделирования (ввиду случайного характера отказов ОбЭ) обеспечивалось проведением 10^4 экспериментов для каждого набора исходных данных.

Для исследования влияния удаленности БС от объектов обслуживания на коэффициенты готовности ОЭ (эксперимент А, рис. 6) в структуре ПРОЭ предусматривалось функционирование одной БС, последовательно отдаляющейся от одного из ОЭ (и, соответственно, приближающейся либо равноудаленной к другим).

Помимо ожидаемого увеличения длительности неработоспособного состояния (снижения коэффициента готовности) ОЭ₁ (линия K_1 на графике) по мере удаления от него БС, результаты эксперимента показали, что изменение показателей надежности ОЭ нелинейно. Более того, при определенных исходных данных (на графике – при длительности прохождения пути между БС и ОЭ₁ ≥ 100 ч) происходит синхронное снижение готовности и остальных ОЭ (линии $K_2 - K_4$ на графике).

Этот факт свидетельствует о важности учета возможного местоположения баз снабжения при принятии решения о совершенствовании системы эксплуатации территориально-распределенных систем.

Еще более важно учитывать характер изменения показателей готовности таких объектов в случае различной критичности их работоспособности к решению целевых задач (например, командный пункт, системы связи и т. п.).

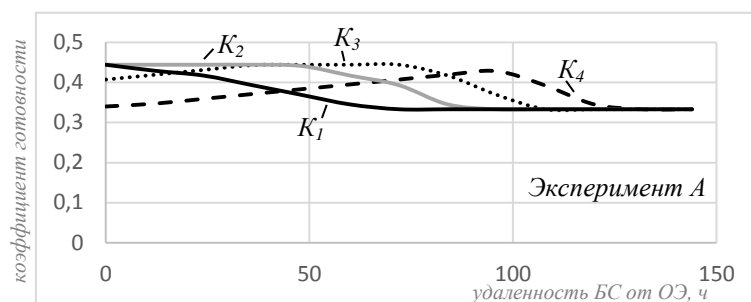
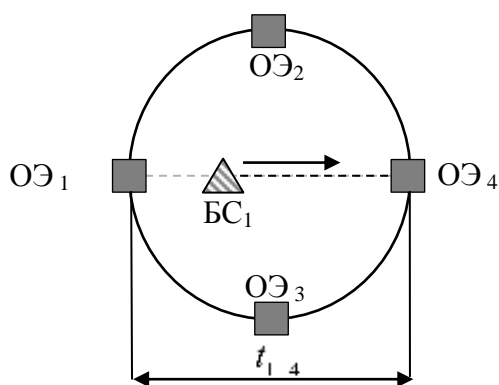


Рис. 6. Геометрическая интерпретация и результаты эксперимента исследования влияния удаленности БС от объектов обслуживания на коэффициенты готовности ОЭ

В ходе эксперимента Б (рис. 7) в структуре ПРОЭ предусматривалось функционирование двух БС, находящихся на максимальном удалении друг от друга и последовательно приближающихся к центру территориального расположения всех ОЭ.

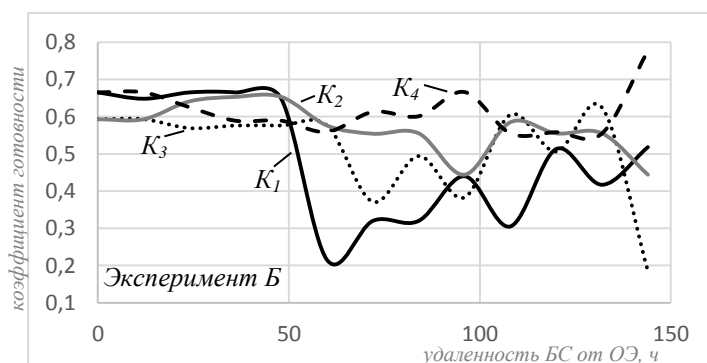
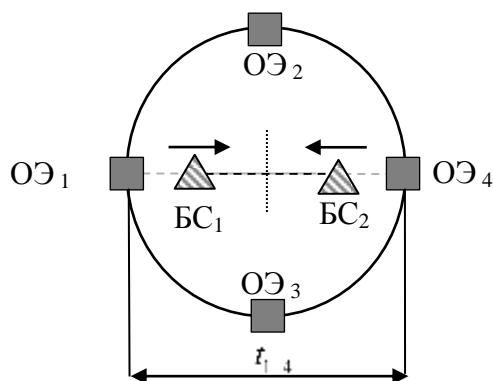


Рис. 7. Геометрическая интерпретация и результаты эксперимента исследования влияния расположения БС на готовность ОЭ

Полученные зависимости нелинейны и имеют локальные экстремумы. Так, несмотря на существенный выигрыш в готовности по сравнению с экспериментом А, при определенных исходных данных (на графике – при длительности прохождения пути между БС и ОЭ₁ ≈ 60 ч; при длительности прохождения пути между БС и ОЭ₃ ≈ 70 ч) возможно резкое снижение готовности ОЭ. Однако такое снижение несинхронно с динамикой показателей готовности других ОЭ, что позволяет утверждать о необходимости предварительного анализа последствий принимаемых управленческих решений о количестве и взаиморасположении баз снабжения.

Полученные результаты эксперимента логически непротиворечивы и подтверждают влияние на исследуемые параметры как удаленности БС от объектов эксплуатации, так и числа таких БС и их взаиморасположения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная в статье модель позволяет установить зависимость коэффициента готовности (продолжительности нахождения в неработоспособном состоянии) территориально-распределенного объекта эксплуатации не только от показателей надежности его элементов, но и от пространственного размещения его составных частей, что во многом определяет па-

раметры его системы эксплуатации (в том числе интенсивность восстановления работоспособного состояния). Несмотря на случайный характер отказов элементов, предложенные математические модели функционирования составных частей территориально-распределенного объекта эксплуатации при достижении статистически устойчивых результатов с помощью ЭВМ позволяют лицу, принимающему решения, оценить результативность принимаемых решений без непосредственной реализации такого решения.

Практическая значимость предложенной модели заключается в возможности ее использования (с учетом ее реализации в виде законченного программного продукта) при планировании эксплуатационных процессов территориально-распределенных объектов эксплуатации, оценке ресурсоемкости таких процессов и дальнейшем совершенствовании научно-методического аппарата обоснования мероприятий технического обслуживания и ремонта сложных технических систем.

В целом использование предложенной модели совместно с соответствующими методами оптимизации расширяет инструментарий для решения целого класса прикладных задач – оценки эффективности существующих территориально-распределенных структур, коррекции способов их сервисного обслуживания, планирования запасов, обоснования вариантов их оптимального построения и т. д.

Список используемых источников

1. Методика обоснования рациональных параметров подвижной системы обеспечения запасными частями мобильных сложных технических комплексов / А. Н. Дьяков [и др.]. // *Современные наукоемкие технологии*. – 2019. – № 10. – С. 50–55.
2. *Кокарев А. С., Дьяков А. Н., Пачин А. В.* Модель ресурсоемкости подвижных систем обеспечения запасными частями мобильных сложных технических комплексов // *Вооружение и экономика*. – 2020. – № 1. – С. 74–78.
3. *Дьяков А. Н., Кокарев А. С., Пачин А. В.* Методика выбора параметров системы пополнения многономенклатурного комплекта запасных частей // *Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского*. – 2020. – Вып. 672. – С. 289–298.
4. *Дьяков А. Н., Кокарев А. С., Левчук А. А.* Методика обоснования параметров системы технического обслуживания и ремонта передающего радиотехнического объекта // *Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского*. – 2021. – Вып. 677. – С. 37–49.
5. Программа расчета готовности территориально-распределенных объектов эксплуатации: свид-во о гос. регистрации программы для ЭВМ RU2021619418 / Д. А. Бондаренко, А. Н. Дьяков, А. С. Кокарев; заявители и правообладатели Д. А. Бондаренко, А. Н. Дьяков, А. С. Кокарев. – № 2021618558; заявл. 01.06.2021; опубл. 09.06.2021. – 1 с.

А. Н. Дьяков,
кандидат технических наук, доцент;
А. С. Кокарев,
кандидат технических наук;
А. В. Пачин,
кандидат технических наук;
Д. В. Шаповалов,
кандидат технических наук

МОДЕЛЬ ПОДДЕРЖАНИЯ ГОТОВНОСТИ МНОГОКАНАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ С РЕГЛАМЕНТИРОВАННЫМ ОБСЛУЖИВАНИЕМ

В статье рассматривается система технического обслуживания и ремонта передающего радиотехнического объекта (ПРТО), от функционирования которой в значительной мере зависит его эффективность. Предложен новый способ оценивания процесса технического обслуживания и ремонта (ТОиР) многоканального ПРТО. Разработана новая модель поддержания готовности многоканальных сложных технических систем, позволяющая установить зависимость готовности и величины эксплуатационных затрат от конструктивно-компоновочной схемы устройства, надежности элементов, периодичности регламентов и ресурсоемкости эксплуатационных мероприятий.

Применение разработанной модели поддержания готовности в сочетании с методами оптимального выбора позволит обосновать межрегламентные периоды устройств в составе ПРТО, обеспечивающие требуемую готовность с минимальными эксплуатационными затратами. Представленные результаты апробации подтверждают практическую значимость разработанного научно-методического аппарата.

Ключевые слова: система технического обслуживания и ремонта, обоснование параметров обслуживания, регламентированное обслуживание, межрегламентный период, передающий радиотехнический объект.

ВВЕДЕНИЕ

Для современных сложных технических систем (СТС) характерен широкий спектр типов применяемых составных частей и способов поддержания их готовности. Микропроцессорные приборы и элементная база, как правило, в условиях эксплуатирующей организации неремонтопригодны и эксплуатируются до перехода в предельное состояние. Восстановление готовности СТС, в состав которых они входят, выполняется силами эксплуатирующего персонала заменой типовых элементов. Другие устройства, выполняющие, например, преобразование видов энергии (двигатели, генераторы, компрессорные установки), требуют периодического проведения профилактических мероприятий для поддержания их готовности к применению. Система технического обслуживания и ремонта (СТОиР) сложных технических систем, имеющих в своем составе такие устройства, должна быть спроектирована с учетом широкого разнообразия устройств и применяемых способов их технического обслуживания и ремонта. Используемые элементы модели должны быть чувствительны к параметрам СТОиР устройств и составных частей, а также характеризовать их связь с показателями готовности СТС и эксплуатационных затрат.

В представленной статье рассматривается передающий радиотехнический объект (ПРТО), один из образцов вооружения Космических войск, и его система технического обслуживания и ремонта. Рассматриваемый ПРТО имеет в своем составе I сложных технических систем. В составе каждой i -й СТС имеется k типовых элементов замены (ТЭЗ). Каждая i -я СТС имеет уникальные параметры СТОиР одного из двух типов: регламентированное обслуживание или обслуживание по состоянию. При проектировании системы эксплуатации (СЭ) вновь создаваемой ПРТО, либо оптимизации СЭ эксплуатируемого ПРТО следует обосновать пара-

метры СТОиР каждой i -й СТС, оптимальной по критериям обеспечиваемых СЭ показателей результативности, а также минимальных затрат на функционирование этой СЭ:

$$\vec{X}^* \rightarrow \underset{K_r(\vec{X}) \geq K_r^{Tp}}{\text{Argmin}} C(\vec{X}), \quad (1)$$

где $K_r(X)$ – показатель результативности системы эксплуатации;

$C(X)$ – величина эксплуатационных затрат;

X – вектор параметров ПРТО и его системы ТОиР.

Для решения такой задачи требуются адекватные модели поддержания готовности устройств с регламентированным обслуживанием и обслуживанием по состоянию. Модели поддержания готовности устройств, обслуживаемых по состоянию, представлены в [1–3] и в данной статье не рассматриваются. Модели поддержания готовности устройств с регламентированным обслуживанием были ранее описаны в [4, 5], однако они не в полной мере удовлетворяют условиям задачи (1), так как не учитывают особенности функционирования ПРТО описанные далее.

Традиционно для оценивания результативности системы эксплуатации сложных технических систем используется коэффициент готовности, либо коэффициент технического использования [6, 7]. Однако в отличие от них, для многоканального устройства коэффициент готовности следует рассчитывать иначе, как отношение продолжительности эксплуатации, при которой число работоспособных каналов соответствует требованиям к общей продолжительности периода эксплуатации (рис. 1):

$$K_r = \frac{\sum_{g=1}^G t_g}{T_{пэ}},$$

где t_g – продолжительность g -го периода эксплуатации, при котором доля работоспособных каналов соответствует требованиям;

$T_{пэ}$ – продолжительность периода эксплуатации;

G – количество периодов, при которых количество работоспособных каналов соответствует требованиям.

Практика эксплуатации последних лет показывает снижение готовности ПРТО, которое происходит из-за недостатков функционирования системы технического обслуживания и ремонта. Длительность восстановления работоспособного состояния отдельных СТС не обеспе-

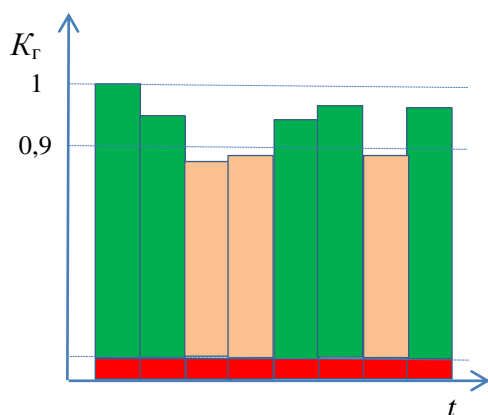


Рис. 1. Диаграмма изменения состояния i -й сложной технической системы

чивает достижение заданного показателя готовности. Так в 2020 году причинами снижения готовности ПРТО стали многочисленные отказы ТЭЗ и большая длительность нахождения шести СТС в состоянии, при котором число работоспособных каналов было менее требуемого значения (рис. 2). В то же время в состав ПРТО входят девять СТС, имеющих аналогичные параметры регламентированной системы ТОиР, поддержание их готовности требует сопоставимых по величине временных и трудовых затрат, как показано на рис. 3. Можно сделать вывод о том, что для трех СТС выполняемые мероприятия ТОиР обеспечивают лучший результат, что объясняется их иной конструктивно-компоновочной схемой и иными показателями надежности ТЭЗ в составе СТС.

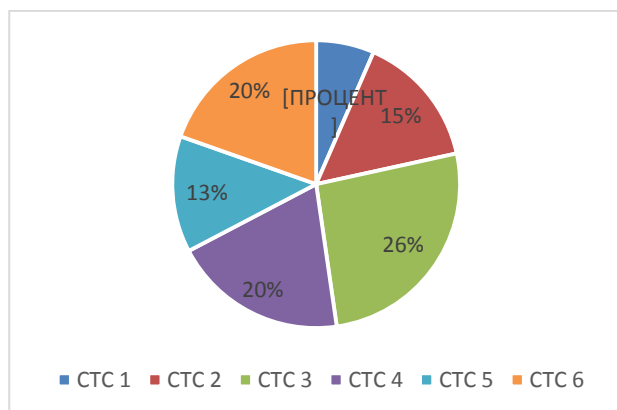


Рис. 2. Доли отказов СТС, явившихся причинами снижения готовности ПРТО

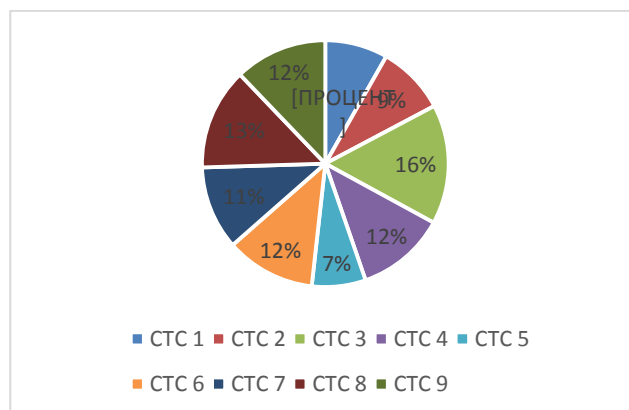


Рис. 3. Затраты ресурсов на ТОиР СТС в составе ПРТО

Дальнейшее исследование вопроса эффективности проводимых мероприятий ТОиР и их влияния на готовность ПРТО в целом требует моделирования процесса поддержания готовности СТС. Существующие модели не в полной мере адекватны исследуемому процессу, так как не позволяют учесть параметры существующей системы ТОиР, в частности, они не позволяют установить зависимость показателей готовности и величины затрат на поддержание готовности устройств от их конструктивно-компоновочной схемы, надежности составляющих его типовых элементов замены и периодичности обслуживания.

МОДЕЛЬ ПОДДЕРЖАНИЯ ГОТОВНОСТИ МНОГОКАНАЛЬНОГО СЛОЖНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА

Многоканальный принцип построения ПРТО в целом, и СТС в частности позволяет обеспечивать требуемые целевые показатели при сохранении работоспособного состояния K ТЭЗ из имеющихся M в составе каждой i -й СТС. В рамках представленной статьи отказ отдельного ТЭЗ будет определять отказ приемно-передающего канала, а отказ более чем $M - K$ ТЭЗ будем называть критическим отказом i -й СТС. Принимая во внимание невысокие показатели безотказности электронных ТЭЗ, при составлении модели необходимо учесть соотношение интенсивностей отказов λ ТЭЗ, периодичность регламента T_p , в ходе которого оценивается техническое состояние всех M_i ТЭЗ в составе i -й СТС и производится замена отказавших. При этом основным целевым показателем функционирования СТС следует полагать условие K_i / M_i , определяющее ее соответствие тактико-техническим требованиям, а показателем функционирования системы ТОиР следует считать K_r , который в данном случае рассчитывается как отношение продолжительности эксплуатации, при которой условие K_i / M_i работоспособных каналов соответствовало требованиям, к общей продолжительности периода эксплуатации. Необходимо найти для каждого i -го устройства следующую зависимость:

$$K_{ri} = f_1(K_i, M_i, \lambda_i, T_p). \quad (2)$$

Одновременно необходимо найти зависимость вида

$$C_i = f_2(K_i, M_i, \lambda_i, T_p, C_{iv}), \quad (3)$$

где K_i, M_i – параметры характеризующие структуру i -го СТС, готовность которой к применению по назначению определяется работоспособностью K типовых элементов замены из M соединенных параллельно;
 λ_i – интенсивность отказов однотипных ТЭЗ в составе i -й СТС;

- T_{pi} – периодичность выполнения контрольно-профилактических мероприятий в отношении i -й СТС с регламентированной системой ТОиР;
 $C_{зч_i}, C_{то_i}$ – ресурсоемкость выполнения мероприятий ТОиР i -й СТС в части замены отказавших за межрегламентный период типовых элементов.

При наличии аналитических зависимостей (2) и (3) возможно решение оптимизационной задачи (1) посредством выбора значений параметров системы ТОиР i -й СТС.

Структурная схема надежности i -й СТС в общем виде показана на рис. 4, где представлено параллельное соединение M однотипных ТЭЗ, готовность к применению по назначению i -й СТС определяется условием работоспособности K из M работоспособных ТЭЗ.

Составим граф состояний (рис. 5), характеризующий процесс поддержания готовности i -й СТС в составе $\Upsilon_i = M_i + 1$ состояний [3]. Мероприятия технического обслуживания и ремонта предполагают проведение проверок технического состояния и замены отказавших ТЭЗ с периодичностью T_{pi} для каждой i -й СТС и ресурсоемкости C_{v_i} операций.

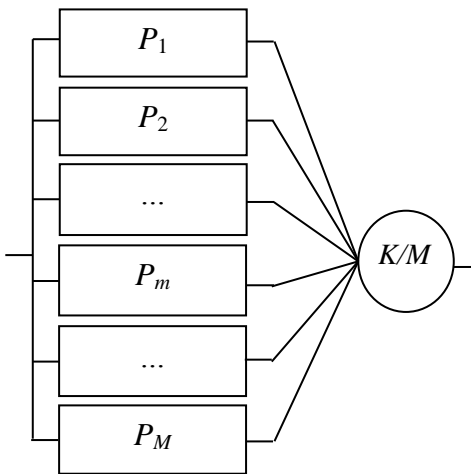


Рис. 4. Структурная схема надежности i -й СТС

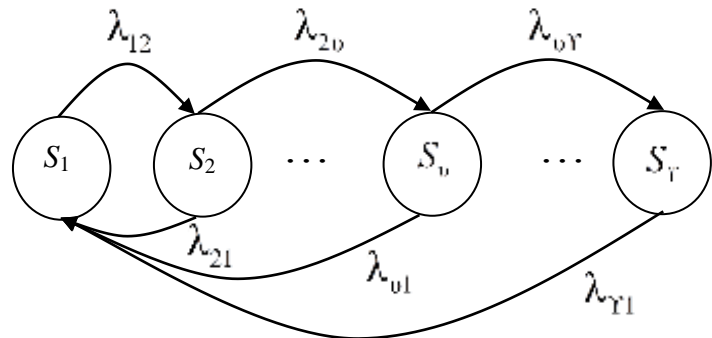


Рис. 5. Графовая модель поддержания готовности i -й СТС

После завершения регламентных работ i -я СТС через случайное время наработки на отказ одного из ТЭЗ может перейти из состояния S_1 в состояние S_2 , отказ следующего ТЭЗ переводит СТС в состояние S_3 и так далее до последнего состояния S_Υ . Очевидно, коэффициент готовности i -й СТС определяется длительностью нахождения в состоянии S_1 , т. е. вероятностью застать в работоспособном состоянии все ТЭЗ в случайный момент времени: $K_\Upsilon = p_1$ при $M_i = K_i$. В случае когда $K_i < M_i$ коэффициент готовности определяется суммой длительностей нахождения в состоянии S_1 и в других состояниях, число которых определяется как

$$K_{\Upsilon i} = p_1 + \sum_{v=2}^{\Upsilon-K} p_v, \text{ при } K < M. \quad (4)$$

Стрелки соединяющие состояния $S_1 - S_\Upsilon$ описывают интенсивность потоков событий.

Найдем аналитические зависимости для расчета стационарных вероятностей состояний, для чего составим систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dp_1}{dt} = \lambda_{21}p_2 + \lambda_{31}p_3 + \dots + \lambda_{v1}p_v + \dots + \lambda_{\gamma 1}p_{\gamma} - \lambda_{12}p_1; \\ \frac{dp_2}{dt} = \lambda_{12}p_1 - (\lambda_{21} + \lambda_{23})p_2; \\ \frac{dp_3}{dt} = \lambda_{23}p_2 - (\lambda_{31} + \lambda_{34})p_3; \\ \dots \\ \frac{dp_v}{dt} = \lambda_{v-1 v}p_{v-1} - (\lambda_{v 1} + \lambda_{v v+1})p_v; \\ \dots \\ \frac{dp_{\gamma}}{dt} = \lambda_{\gamma-1 \gamma}p_{\gamma-1} - \lambda_{\gamma 1}p_{\gamma}. \end{cases} \quad (5)$$

Добавляя нормировочное уравнение $\sum_{v=1}^{\gamma} p_v = 1$, решим систему:

$$\begin{cases} \lambda_{12}p_1 = \lambda_{21}p_2 + \lambda_{31}p_3 + \dots + \lambda_{v1}p_v + \dots + \lambda_{\gamma 1}p_{\gamma}; \\ (\lambda_{21} + \lambda_{23})p_2 = \lambda_{12}p_1; \\ (\lambda_{31} + \lambda_{34})p_3 = \lambda_{23}p_2; \\ \dots \\ (\lambda_{v 1} + \lambda_{v v+1})p_v = \lambda_{v-1 v}p_{v-1}; \\ \dots \\ \lambda_{\gamma 1}p_{\gamma} = \lambda_{\gamma-1 \gamma}p_{\gamma-1}; \\ \sum_{v=1}^{\gamma} p_v = 1. \end{cases} \quad (6)$$

Для вывода общего вида аналитической зависимости представим решение системы уравнений на примере СТС в составе восьми ТЭЗ:

$$p_1 = \left(1 + \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{21} + \lambda_{23}} \left(1 + \frac{\lambda_{23}}{\lambda_{31} + \lambda_{34}} \left(1 + \frac{\lambda_{34}}{\lambda_{41} + \lambda_{45}} \left(1 + \frac{\lambda_{45}}{\lambda_{51} + \lambda_{56}} \left(1 + \frac{\lambda_{56}}{\lambda_{61} + \lambda_{67}} \left(1 + \frac{\lambda_{67}}{\lambda_{71} + \lambda_{78}} \left(1 + \frac{\lambda_{78}}{\lambda_{81} + \lambda_{89}} \left(1 + \frac{\lambda_{89}}{\lambda_{91}} \right) \right) \right) \right) \right) \right) \right) \right)^{-1}; \quad (7)$$

$$p_2 = \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{21} + \lambda_{23}} \times \left(1 + \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{21} + \lambda_{23}} \left(1 + \frac{\lambda_{23}}{\lambda_{31} + \lambda_{34}} \left(1 + \frac{\lambda_{34}}{\lambda_{41} + \lambda_{45}} \left(1 + \frac{\lambda_{45}}{\lambda_{51} + \lambda_{56}} \left(1 + \frac{\lambda_{56}}{\lambda_{61} + \lambda_{67}} \left(1 + \frac{\lambda_{67}}{\lambda_{71} + \lambda_{78}} \left(1 + \frac{\lambda_{78}}{\lambda_{81} + \lambda_{89}} \left(1 + \frac{\lambda_{89}}{\lambda_{91}} \right) \right) \right) \right) \right) \right) \right) \right)^{-1} \quad (8)$$

и так далее до p_9 .

В общем виде выражения для расчета вероятностей нахождения в состояниях $S_2 - S_{\gamma}$ могут быть представлены:

– для первого состояния, $v=1$

$$p_1 = \left(1 + \sum_{v=1}^{M-1} \left(\prod_{h=1}^v \frac{\lambda_{h h+1}}{\lambda_{h+1 1} + \lambda_{h+1 h+2}} \right) + \frac{\lambda_{\gamma-1 \gamma}}{\lambda_{\gamma 1}} \left(\prod_{h=1}^{M-1} \frac{\lambda_{h h+1}}{\lambda_{h+1 1} + \lambda_{h+1 h+2}} \right) \right)^{-1}; \quad (9)$$

– для второго и последующих состояний, кроме последнего, $1 < v < \gamma$

$$p_v = \prod_{h=2}^v \frac{\lambda_{h-1 h}}{\lambda_{h 1} + \lambda_{h h+1}} \times \left(1 + \sum_{v=1}^{M-1} \left(\prod_{h=1}^v \frac{\lambda_{h h+1}}{\lambda_{h+1 1} + \lambda_{h+1 h+2}} \right) + \frac{\lambda_{\gamma-1 \gamma}}{\lambda_{\gamma 1}} \left(\prod_{h=1}^{M-1} \frac{\lambda_{h h+1}}{\lambda_{h+1 1} + \lambda_{h+1 h+2}} \right) \right)^{-1}. \quad (10)$$

Для последнего состояния γ получаем зависимость

$$p_{\gamma} = \frac{\lambda_{\gamma-1 \gamma}}{\lambda_{\gamma 1}} \prod_{h=1}^M \left(\frac{\lambda_{h h+1}}{\lambda_{h 1} + \lambda_{h h+1}} \right) \times \left(1 + \sum_{v=1}^{M-1} \left(\prod_{h=1}^v \frac{\lambda_{h h+1}}{\lambda_{h+1 1} + \lambda_{h+1 h+2}} \right) + \frac{\lambda_{\gamma-1 \gamma}}{\lambda_{\gamma 1}} \left(\prod_{h=1}^{M-1} \frac{\lambda_{h h+1}}{\lambda_{h+1 1} + \lambda_{h+1 h+2}} \right) \right)^{-1}. \quad (11)$$

Аналитические зависимости (9)–(11) позволяют рассчитывать стационарные вероятности нахождения в любом состоянии $v = \overline{1, \Upsilon}$. Показатель готовности i -й СТС в таком случае, с учетом (4), рассчитывается как

$$K_{\Gamma} = p_1 + \sum_{v=2}^{M-K+1} p_v, \text{ при } K < M. \quad (12)$$

Аналитические зависимости (9)–(11) представлены для интенсивностей переходов между состояниями в общем виде. Для нахождения зависимости (2) обозначим μ – интенсивность перехода из всех состояний, кроме первого, в состояние S_1 , понимая под этим показателем значение обратнопропорциональное периодичности регламентных работ T_{p_i} . Принимая для всех ТЭЗ i -й СТС равными интенсивности отказов λ_i , найдем интенсивности переходов между состояниями.

Допуская нахождение i -й СТС в начальный момент времени в предпоследнем состоянии $S_{\Upsilon-1}$, очевидно интенсивность перехода в последнее состояние S_{Υ} будет равна λ_i – интенсивности отказа одного ТЭЗ. Интенсивность перехода из состояния $S_{\Upsilon-2}$ в предпоследнее состояние $S_{\Upsilon-1}$ равна двум интенсивностям отказа одного ТЭЗ – $2\lambda_i$ (для системы в составе двух ТЭЗ). Очевидно, для любого количества состояний Υ интенсивность перехода из состояния v в следующее за ним состояние $v+1$ будет рассчитана следующим образом:

$$\lambda_{v, v+1} = (\Upsilon - v)\lambda_i. \quad (13)$$

Проведя преобразования с учетом (13), выражения (9)–(11) для вероятностей нахождения в состояниях $v = \overline{1, \Upsilon}$ однотипных ТЭЗ в общем виде представим как

$$p_1 = \left(1 + \sum_{v=1}^{M-1} \left(\prod_{h=1}^v \frac{(\Upsilon - h)\lambda}{\lambda_{h+1} + (\Upsilon - h - 1)\lambda} \right) + \frac{\lambda}{\lambda_{\Upsilon-1}} \left(\prod_{h=1}^{M-1} \frac{(\Upsilon - h)\lambda}{\lambda_{h+1} + (\Upsilon - h - 1)\lambda} \right) \right)^{-1}. \quad (14)$$

Вероятность нахождения в состоянии v (любое, кроме первого и последнего) представим в виде

$$p_v = \prod_{h=2}^v \frac{(\Upsilon - h + 1)\lambda}{\lambda_{h-1} + (\Upsilon - h)\lambda} \times \left(1 + \sum_{v=1}^{M-1} \left(\prod_{h=1}^v \frac{(\Upsilon - h)\lambda}{\lambda_{h+1} + (\Upsilon - h - 1)\lambda} \right) + \frac{\lambda}{\lambda_{\Upsilon-1}} \left(\prod_{h=1}^{M-1} \frac{(\Upsilon - h)\lambda}{\lambda_{h+1} + (\Upsilon - h - 1)\lambda} \right) \right)^{-1}, \quad (15)$$

а вероятность нахождения в последнем состоянии Υ в виде

$$p_{\Upsilon} = \frac{\lambda}{\lambda_{\Upsilon-1}} \times \prod_{h=2}^{\Upsilon} \frac{(\Upsilon - h + 1)\lambda}{\lambda_{h-1} + (\Upsilon - h)\lambda} \times \left(1 + \sum_{v=1}^{M-1} \left(\prod_{h=1}^v \frac{(\Upsilon - h)\lambda}{\lambda_{h+1} + (\Upsilon - h - 1)\lambda} \right) + \frac{\lambda}{\lambda_{\Upsilon-1}} \left(\prod_{h=1}^{M-1} \frac{(\Upsilon - h)\lambda}{\lambda_{h+1} + (\Upsilon - h - 1)\lambda} \right) \right)^{-1}. \quad (16)$$

В выражениях (14)–(16) все интенсивности переходов от состояния с большим номером к состоянию с меньшим номером при расчетах следует заменить на μ , которая определяется как $\mu = \frac{1}{T_{p_i}}$. С учетом (14)–(16) аналитическая зависимость для расчета коэффициента готовности i -й СТС (12), при любом количестве ТЭЗ – M , для условия его соответствия предъявленным требованиям – K исправных ТЭЗ из общего числа M , принимает вид

$$K_{\Gamma} = \left(1 + \sum_{v=1}^{M-1} \left(\prod_{h=1}^v \frac{(\Upsilon-h)\lambda}{\mu + (\Upsilon-h-1)\lambda} \right) + \frac{\lambda}{\mu} \left(\prod_{h=1}^{M-1} \frac{(\Upsilon-h)\lambda}{\mu + (\Upsilon-h-1)\lambda} \right) \right)^{-1} + \\ + \sum_{v=2}^{M-K+1} \left(\prod_{h=2}^v \frac{(\Upsilon-h+1)\lambda}{\mu + (\Upsilon-h)\lambda} \times \left(1 + \sum_{v=1}^{M-1} \left(\prod_{h=1}^v \frac{(\Upsilon-h)\lambda}{\mu + (\Upsilon-h-1)\lambda} \right) + \frac{\lambda}{\mu} \left(\prod_{h=1}^{M-1} \frac{(\Upsilon-h)\lambda}{\mu + (\Upsilon-h-1)\lambda} \right) \right)^{-1} \right).$$

После преобразования с учетом $\Upsilon_i = M_i + 1$ аналитическая зависимость для расчета готовности i -го устройства принимает вид

$$K_{\Gamma_i} = \frac{\left(1 + \sum_{v=2}^{M_i-K_i+1} \left(\prod_{h=2}^v \frac{(M_i-h+2)\lambda_i}{\frac{1}{T_{p_i}} + (M_i-h+1)\lambda_i} \right) \right)}{\left(1 + \sum_{v=1}^{M_i-1} \left(\prod_{h=1}^v \frac{(M_i-h+1)\lambda_i}{\frac{1}{T_{p_i}} + (M_i-h)\lambda_i} \right) + \frac{\lambda_i}{\frac{1}{T_{p_i}}} \left(\prod_{h=1}^{M_i-1} \frac{(M_i-h+1)\lambda_i}{\frac{1}{T_{p_i}} + (M_i-h)\lambda_i} \right) \right)}. \quad (17)$$

Величина ресурсоемкости, соответствующей такому процессу поддержания готовности i -го устройства, рассчитывается как

$$C_i = \left(M_i \lambda_i T_{p_i} C_{зч_i} + C_{то_i} \right) \frac{T_{\text{э}}}{T_{p_i}}, \quad (18)$$

где $C_{зч_i}$ – составляющая затрат, определяемая потребным количеством замен неисправных составных частей на межрегламентном периоде T_{p_i} ;

$C_{то_i}$ – составляющая затрат на проведение работ, зависящая от количества заменяемых на межрегламентном периоде T_{p_i} неисправных составных частей;

$T_{\text{э}}$ – период эксплуатации СТС, для которого рассчитывается коэффициент готовности и величина затрат.

Аналитическая зависимость (17) позволяет рассчитать коэффициент готовности каждой i -й многоканальной СТС, готовность которой к применению по назначению определяется исправностью K каналов (ТЭЗ) из общего количества M , от надежности составных частей и межрегламентного периода T_p .

Аналитическая зависимость (18) позволяет рассчитать величину эксплуатационных затрат при тех же исходных данных. Вид функции позволяет применить методы оптимизации при решении «обратной задачи» с целью обоснования значений параметров, обеспечивающих требуемый показатель готовности, при минимальных эксплуатационных затратах.

АПРОБАЦИЯ МОДЕЛИ ПОДДЕРЖАНИЯ ГОТОВНОСТИ МНОГОКАНАЛЬНЫХ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Аналитические зависимости (14)–(16) позволяют определить стационарные вероятности нахождения в состояниях $S_1 - S_{\Gamma}$, зависимость (17) позволяет рассчитать коэффициент готовности устройства. В отличие от известных, представленная модель поддержания готовности позволяет установить зависимость искомых показателей не только от надежности ТЭЗ и периода выполнения мероприятий ТОиР, но и от условия, определяющего готовность многоканального объекта эксплуатации к применению по назначению (ПРТО обеспечивает реализацию функциональных возможностей при работоспособности K ТЭЗ из общего числа M в

конструктивно-компоновочной схеме объекта). Вспомогательная модель (18) позволяет прогнозировать величину эксплуатационных затрат, затрачиваемых при поддержании готовности. Полученные модели использованы при расчетах готовности i -х СТС, исходные данные и результаты проведенных расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные и результаты расчетов готовности и величины затрат, обусловленных мероприятиями регламентированного обслуживания СТС

Наименование показателя	Обозначение	СТС № 1	СТС № 2	СТС № 3	СТС № 4
Условие готовности i -й многоканальной СТС к применению по назначению	K/M	7/8	14/16	28/32	43/48
Интенсивность отказов ТЭЗ i -й многоканальной СТС	λ_i	0,00002	0,00005	0,0001	0,0002
Период проведения мероприятий ТОиР i -й многоканальной СТС	T_{pi}	1 месяц	1 месяц	1 неделя	1 неделя
Составляющая эксплуатационных затрат, обусловленная заменой каждого ТЭЗ i -й многоканальной СТС на межрегламентном периоде	$C_{зч_i}$	12 у.д.е.	22 у.д.е.	14 у.д.е.	6 у.д.е.
Составляющая затрат на выполнение мероприятий ТОиР на межрегламентном периоде (без учета количества заменяемых ТЭЗ)	$C_{то_i}$	16 у.д.е.	16 у.д.е.	16 у.д.е.	7 у.д.е.
Прогнозируемые на периоде эксплуатации T_3 значения коэффициента готовности	$K_{г_i}$	0,991	0,957	0,996	0,951
Прогнозируемые на периоде эксплуатации T_3 значения величины эксплуатационных затрат	C_i	2115 у.д.е.	3488 у.д.е.	1227 у.д.е.	8696 у.д.е.

Зависимость готовности и величины затрат на поддержание готовности i -й СТС от периодичности T_{pi} мероприятий ТОиР представлена на рис. 6 и 7.

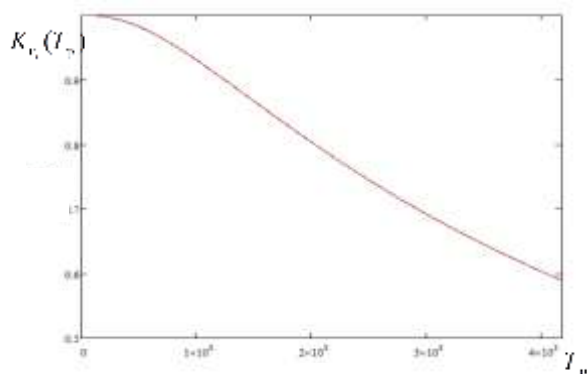


Рис. 6. Зависимость коэффициента готовности i -й СТС от межрегламентного периода

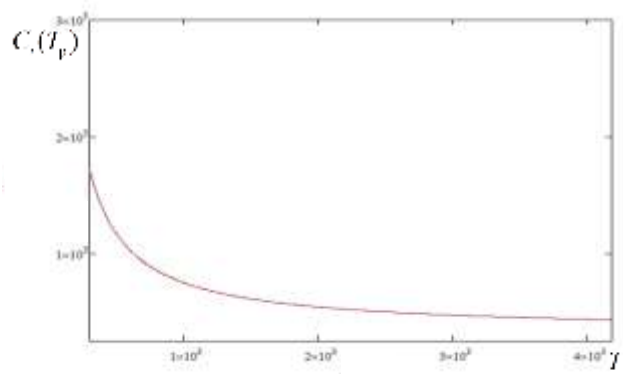


Рис. 7. Зависимость величины затрат на поддержание готовности i -й СТС от межрегламентного периода

При известной структурной схеме надежности ПРТО, имеющей в своем составе I СТС, составляется аналитическая зависимость, устанавливающая связь готовности ПРТО с параметрами, характеризующими процессы технического обслуживания и ремонта K_i/M_i , λ_i , T_{pi} , $C_{зч_i}$, $C_{то_i}$ каждой i -й СТС. Зависимость для расчета величины затрат представляет функцию ограничений. Совместное применение целевой функции и функции ограничений позволяет обосновать рациональные значения параметров, например, межрегламентные периоды для каждой СТС, как показано на рис. 8.

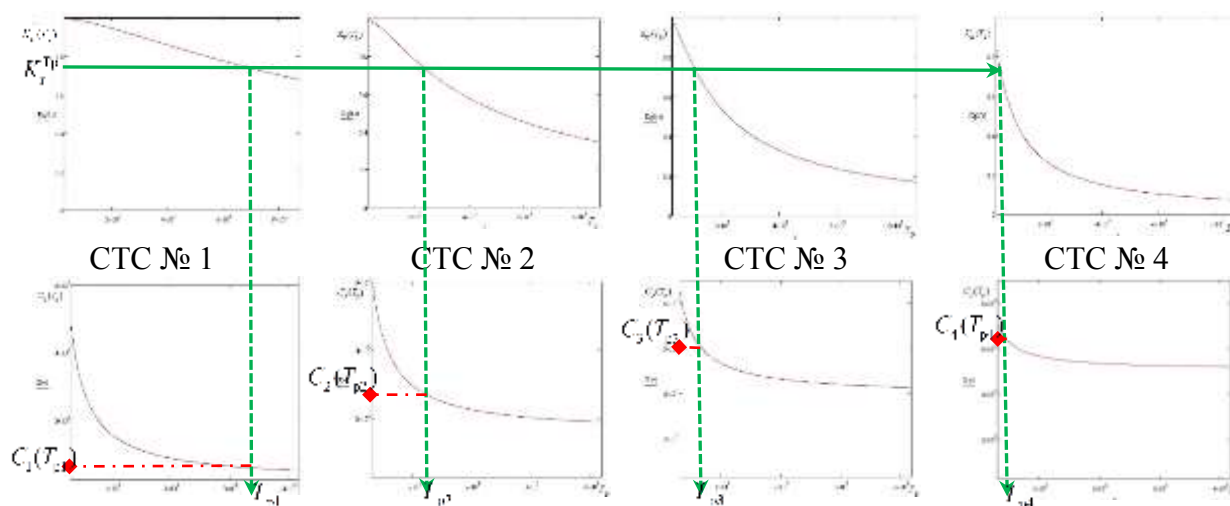


Рис. 8. Способ обоснования межрегламентных периодов j -х СТС и расчета затрат на поддержание требуемого показателя готовности ПРТО

Графическое представление на рис. 8 демонстрирует применимость полученных зависимостей (17) и (18) для обоснования выбора межрегламентного периода i -х СТС при любой структурной схеме надежности ПРТО, чем определяется их практическая значимость.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эффективность использования любого образца вооружения в существенной мере зависит от качества выполнения мероприятий его технического обслуживания и ремонта. В представленной статье рассмотрен процесс поддержания готовности передающего радиотехнического объекта, который представляет собой многоканальный сложный технический комплекс, имеющий в своем составе I СТС с регламентированной системой ТОиР. Обоснован способ оценивания эффективности системы ТОиР посредством расчета коэффициента готовности, который, в отличие от [6, 8–10], рассчитывается отношением длительности периодов эксплуатации, при которых коэффициент сохранения эффективности ПРТО соответствует тактико-техническим требованиям (ТТТ) к общей продолжительности эксплуатации.

В статье предложена новая модель поддержания готовности многоканальных сложных технических систем, которая позволяет установить зависимость показателя готовности и величины эксплуатационных затрат от конструктивно-компоновочной схемы сложных технических систем в его составе, таких как общее число типовых элементов – M и часть ТЭЗ – K , работоспособность которых обеспечивает выполнение ТТТ ПРТО в целом, а также интенсивности отказов ТЭЗ λ_i , периодичности T_{pi} , ресурсоемкости выполнения эксплуатационных мероприятий $C_{зч_i}$, $C_{то_i}$. В статье использованы стохастический граф и соответствующие ему уравнения Колмогорова для обоснования длительности межрегламентного периода.

Применение разработанной модели поддержания готовности к известной структурной схеме ПРТО в сочетании с одним из известных методов оптимального выбора позволяет обосновать межрегламентный период каждой i -й СТС, обеспечивающей требуемую готовность ПРТО с минимальными эксплуатационными затратами. Результаты проведенной апробации демонстрируют пригодность к применению разработанного научно-методического обеспечения и его практическую значимость.

Список используемых источников

1. DoD 3235.1-H. Test and Evaluation of System Reliability, Maintainability, Reliability // Office of the Director Defense Test and Evaluation. – Washington, 1982.
2. *Викторова В. С., Степаняну А. С.* Проектный анализ контролепригодности технических систем (теория, методы расчета, программное обеспечение). – М.: ИПУ РАН, 2010. – 71 с.
3. *Дьяков А. Н., Решетников Д. В., Кокарев А. С.* Методика выбора стратегии технического обслуживания и ремонта ракетно-космической техники // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2. – URL: www.science-education.ru/ru/article/view?id=21650 (дата обращения: 18.02.2021).
4. *Волков Л. И.* Управление эксплуатацией летательных комплексов: учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1987. – 400 с.
5. Вопросы математической теории надежности / Е. Ю. Барзилович [и др.]; под ред. Б. В. Гнеденко. – М.: Радио и связь, 1983. – 376 с.
6. ГОСТ 27.002–2015. Надежность в технике. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2016. – 28 с.
7. ГОСТ Р 56111–2014. Интегрированная логистическая поддержка экспортируемой продукции военного назначения. Номенклатура показателей эксплуатационно-технических характеристик. – М.: Стандартинформ, 2014 – 12 с.
8. *Дьяков А. Н.* Моделирование системы технического обслуживания и ремонта сложных технических систем ракетно-космических комплексов // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 660. – С. 180–189.
9. *Маричев П. А., Корнев А. С., Хайрулин Р. З.* К оптимальному управлению показателями эффективности парка контрольно-измерительной техники // Вестник МГСУ. – 2017. – № 5(104). – С. 564–571.
10. Устройство для оценки технического уровня средств контроля и диагностирования сложных технических систем: пат. на полезную модель RU 155521 U1 / Дубовский В. А., Вырвич А. А., Гасюк Д. П., Николаев С. Г., Савекин Ф. Н., Гасюк Ю. Д., Ларькин В. В., Ерюшев А. С., Залозный Д. А. – № 2015120966/08; заявл. 02.06.2015; опубл. 10.10.2015. – 1 с.

Б. Д. Казахов,
доктор военных наук, профессор;
В. В. Козлов,
доктор технических наук, профессор;
А. В. Лагун,
кандидат технических наук, доцент

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ АДАПТАЦИИ РАКЕТНОГО КОМПЛЕКСА К ВНЕШНИМ ДЕСТРУКТИВНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ

В ходе комплексной оценки свойств сложных технических систем, в том числе наземных ракетных комплексов, как правило, используют целевой показатель эффективности. При этом важным этапом формирования методических подходов оценивания свойств наземных ракетных комплексов, является процедура определения перечня показателей, с помощью которых возможно с требуемой степенью детализации охарактеризовать итоги формирования данного комплекса в различных условиях обстановки и в различные промежутки времени. Для этого рассмотрены концептуальные положения по созданию системы оценивания наземных ракетных комплексов нового поколения, для которых вводится свойство адаптации. Для оценивания адаптации как свойства предложены выражения для показателя адаптации, позволяющего сформировать направления реализации адаптационных процессов.

Ключевые слова: ракетно-космические комплексы, структурный элемент, ресурсораспределение, жизненный цикл, нештатная ситуация, показатель, координирующие процессы.

ВВЕДЕНИЕ

В ходе эксплуатации комплекса могут возникнуть ситуации, связанные с ожиданием или непосредственным осуществлением деструктивного воздействия на него. В результате данного воздействия наземному ракетному комплексу (НРК) может быть нанесен ущерб, вследствие которого эксплуатация комплекса становится невозможной.

Поэтому при проектировании НРК к нему предъявляются требования, учитывающие фактор деструктивного воздействия, изложенные в тактико-техническом задании (ТТЗ). Потенциал по достижению (выполнению) этих требований обуславливается совокупностью свойств, которые присущи анализируемой организационно-технической системе, используемой в НРК. При этом следует констатировать, что в используемых в настоящее время подходах оценивание возможностей НРК по функционированию в различных условиях, как правило, не учитывается такая характеристика исследуемого комплекса как свойство его адаптации к возможным деструктивным воздействиям и их последствиям.

Теория исследования операций и практика формирования требований, предъявляемых к НРК, оперируют различными понятиями, множество которых можно считать открытым. Однако для исключения ошибок в результате не назначения свойств в это множество, целесообразно расширить номенклатуру таких свойств до максимально возможных границ.

Под адаптацией авторами статьи предлагается понимать признак системы, характеризующий степень ее самоорганизованной приспособленности изменять свою структуру, параметры, последовательность выполнения операций в целях достижения должного (назначенного, установленного и т. д.) уровня результатов функционирования.

При этом алгоритм оценивания возможностей НРК к адаптации в результате деструктивных воздействий должен стать обязательным элементом математического аппарата для проведения исследования оптимальных результатов функционирования данного комплекса в различных условиях обстановки. Необходимо иметь математический аппарат, позволяю-

щий оценивать возможность адаптации комплекса к возможным деструктивным воздействиям на него в процессе эксплуатации.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА АДАПТАЦИИ РАКЕТНОГО КОМПЛЕКСА

Решение задачи адаптации комплекса к внешним деструктивным воздействиям содержит анализ процессов различной природы.

Основной целевой задачей НРК является процесс доставки полезной нагрузки (ПН) на целевую орбиту. Этот процесс заключается в придании ПН необходимой потенциальной и кинетической энергии. Анализ процессов эксплуатации НРК показывает, что главная его функция имеет механическую природу.

Все элементы, из которых состоит НРК, в том числе и обеспечивающие системно-кибернетическую поддержку, имеют вещественно-конструктивную (механическую) компоненту. Большая часть требований, предъявляемых к комплексу (оперативность, защищенность, надежность, безопасность, экономичность, транспортабельность и др.) основаны на механических процессах НРК, описываемых физикой работы и потери работоспособности его агрегатами, системами, узлами и деталями.

Функционирование элементов НРК, обеспечивающих выполнение задач по его назначению, также всецело определяется механическими свойствами технического и технологического оборудования комплекса.

В процессе функционирования комплекса его оборудование выполняет следующие операции:

- изменение пространственного положения элементов НРК (транспортировка, разгрузка, демонтаж, монтаж, перемещение с одного рабочего места на другое и т. п.);
- изменение структуры элементов НРК путем наложения и снятия механических связей между ними;
- обмен между подвижными и стационарными агрегатами и системами комплекса материальными, энергетическими и информационными потоками (выполнение проверок электрических и пневматических коммуникаций, заправки, термостатирования и т. п.).

Принятая детализация функций НРК также показывает, что большинство из процессов подготовки и пуска ракет имеет механический характер. Оборудование существующих комплексов обладает разнообразными техническими решениями для реализации данных процессов. Поэтому среди направлений совершенствования структур и функций нового НРК следует считать и оптимизацию его механической части, которая к тому же является одним из основных потребителей ресурсов. При исследовании свойств механической части оборудования НРК необходимо руководствоваться принципом Гамильтона, который является фундаментальным положением механики.

Согласно данному принципу, НРК может быть рассмотрен как система, энергетика которой описывается функцией Лагранжа (соотношением между кинетической и потенциальной энергией):

$$L(q_1, q_2, \dots, q_s, \dot{q}_1, \dots, \dot{q}_s, t) = L(q, \dot{q}, t),$$

- где q – обобщенная координата;
 \dot{q} – обобщенная скорость;
 s – число степеней свободы системы;
 t – время.

Движение анализируемой системы описывается уравнением Лагранжа:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, s.$$

Функция L обладает свойством адаптивности, выражающимся в том, что уравнения движения каждой из автономно действующей части системы не могут содержать величины, относящиеся к другим частям системы. Поэтому каждому элементу механической системы можно поставить в соответствие свою функцию Лагранжа и движение, при котором энергозатраты минимальны.

Таким образом, совокупность элементов НРК описывается функцией Лагранжа, которая также характеризует минимум энергозатрат системы в целом.

Основываясь на результатах формирования процессов функционирования НРК [1, 2] и учитывая значимость механического оборудования для исследуемого комплекса, можно использовать для определения показателя адаптации функцию Лагранжа, обладающую достаточной общностью для подавляющего числа оборудования.

Интеграл от функции Лагранжа характеризует движение системы объектов между произвольными моментами t_1 и t_2 :

$$S = \int_{t_1}^{t_2} L(q, \dot{q}, t) dt,$$

а его величина, согласно принципу наименьшего действия, имеет наименьшее возможное значение.

Известно положение о том, что для системы тел, участвующих в движении, справедлива запись

$$L = \sum_i \frac{m_i v_i^2}{2},$$

где m_i – масса i -го тела;

v_i – скорость i -го тела.

В силу этого «действие» механических объектов может быть определено соотношением

$$S = \int_1^2 \frac{mv^2}{2} dt = \int_0^t E dt = E \cdot \Delta t = E \cdot t,$$

где E – энергия.

Свойство адаптации комплексное и в него входит свойство способности, как более простое свойство. Для совершения (выполнения) действия, можно ввести обобщенный показатель способности:

$$\Pi_S^{\text{общ}} = \frac{S_{\text{тр}}}{S_{\text{сущ}}} = \frac{E_{\text{тр}} \cdot t_{\text{тр}}}{E_{\text{сущ}} \cdot t_{\text{сущ}}},$$

где $E_{\text{сущ}}$ – энергия, потребляемая комплексом или его отдельными компонентами до конечной адаптации его к внешним деструктивным воздействиям;

$t_{\text{сущ}}$ – время, необходимое для выполнения действия адаптации;

$E_{\text{тр}}$ – требуемое значение энергии, потребляемой комплексом или его отдельными компонентами, для окончания адаптации комплекса;

$t_{\text{тр}}$ – требуемое значение времени для окончания адаптации комплекса;

$S_{\text{тр}}$ – способность выполнить требуемое действие адаптации комплекса.

Согласно полученному выражению для показателя способности Π_s , возможны неоднозначные ситуации, показанные на рис. 1.

Поскольку, в показатель способности входят лишь две переменные (E , t), то следует выбрать условие изменения одной из них. Такое преобразование показателя можно выполнить, приняв в качестве доминирующего параметра значение активных энергетических средств E .

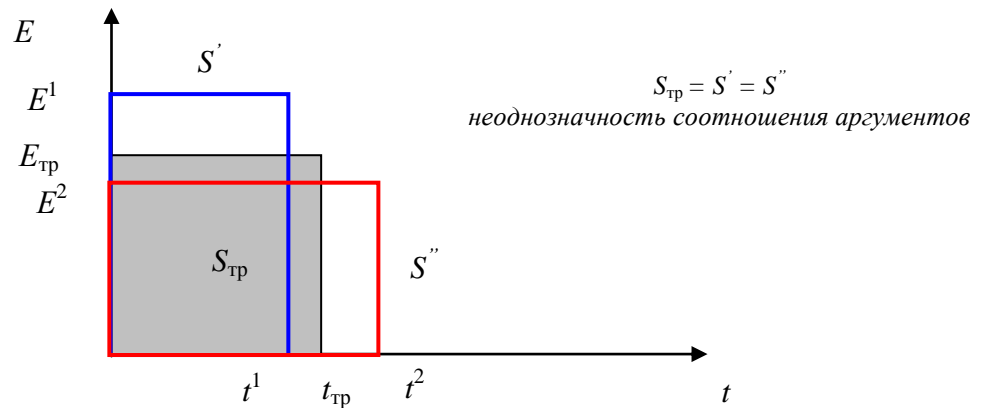


Рис. 1. Графические зависимости затраченной энергии комплексом при его адаптации от времени, необходимого для адаптации

Имеющуюся неоднозначность можно преодолеть, усилив влияние энергетической составляющей на показатель за счет увеличения значения его степени:

$$\Pi_S = \frac{S_{\text{тр}}}{S_{\text{сущ}}} \cdot \left(\frac{E_{\text{тр}}}{E_{\text{сущ}}} \right) = \left(\frac{E_{\text{тр}}}{E_{\text{сущ}}} \right)^2 \cdot \frac{t_{\text{тр}}}{t_{\text{сущ}}}. \quad (1)$$

Так как энергоёмкость для агрегата (системы) в существующем комплексе (до адаптации), может быть выражена через показатель эффективности его функционирования:

$$\Pi_{\text{эф}}^{\text{стар}} = \text{const} \cdot \frac{E_{\text{тр}}^{\text{стар}}}{E_{\text{реал}}^{\text{стар}}},$$

тогда

$$E_{\text{реал}}^{\text{стар}} = \text{const} \cdot \frac{E_{\text{тр}}^{\text{стар}}}{\Pi_{\text{эф}}^{\text{стар}}}.$$

Домножив выражение (1) на две дроби, равные единице, получаем

$$\Pi_S = \left[\frac{E_{\text{тр}}^{\text{нов}}}{E_{\text{реал}}^{\text{стар}}} \right]^2 \frac{t_{\text{тр}}}{t_{\text{сущ}}} = \left[\frac{E_{\text{тр}}^{\text{нов}}}{E_{\text{реал}}^{\text{стар}}} \frac{E_{\text{тр}}^{\text{стар}}}{E_{\text{тр}}^{\text{стар}}} \frac{E_{\text{реал}}^{\text{нов}}}{E_{\text{реал}}^{\text{нов}}} \right]^2 \frac{t_{\text{тр}}}{t_{\text{сущ}}}.$$

После этого вводим показатель эффективности для нового (адаптированного) объекта комплекса аналогично старому:

$$\Pi_{\text{эф}}^{\text{нов}} = \text{const} \cdot \frac{E_{\text{тр}}^{\text{нов}}}{E_{\text{реал}}^{\text{нов}}},$$

тогда выражение для показателя (1) примет вид

$$\Pi_S = \left[\text{const} \cdot \Pi_{\text{эф}}^{\text{нов}} \cdot \Pi_{\text{эф}}^{\text{стар}} \cdot \frac{E_{\text{реал}}^{\text{нов}}}{E_{\text{тр}}^{\text{стар}}} \right]^2 \frac{t_{\text{тр}}}{t_{\text{сущ}}}.$$

В стоимостных параметрах показатель (1) можно выразить следующим образом:

$$\Pi_S = \left[\text{const} \cdot \Pi_{\text{эф}}^{\text{нов}} \cdot \Pi_{\text{эф}}^{\text{стар}} \cdot \frac{C_{\text{реал}}^{\text{нов}}}{C_{\text{тр}}^{\text{стар}}} \right]^2 \frac{t_{\text{тр}}}{t_{\text{сущ}}}. \quad (2)$$

Для проведения адаптации записать соотношения по затратам:

$$C_{\text{реал}}^{\text{нов}} = C_{\text{реал}}^{\text{стар}} + \Delta C^{\text{адапт}}, \quad (3)$$

где $\Delta C_{\text{реал}}^{\text{стар}}$ – вложенные в комплекс ресурсы;

$\Delta C^{\text{адапт}}$ – дополнительные вложения ресурсов в комплекс.

Выражение для показателя способности (2) с учетом (3) можно переписать в следующем виде

$$\Pi_S = \left[\text{const} \cdot \Pi_{\text{эф}}^{\text{нов}} \cdot \Pi_{\text{эф}}^{\text{стар}} \cdot \frac{(C_{\text{реал}}^{\text{стар}} + \Delta C^{\text{адапт}})^2}{C_{\text{тр}}^{\text{стар}}} \right] \frac{t_{\text{тр}}}{t_{\text{сущ}}}.$$

Сделав преобразования, получим новое выражение для показателя способности:

$$\Pi_S = \left[\text{const} \cdot \Pi_{\text{эф}}^{\text{нов}} \cdot \Pi_{\text{эф}}^{\text{стар}} \cdot \frac{\left(1 + \frac{\Delta C^{\text{адапт}}}{C_{\text{реал}}^{\text{стар}}}\right)^2}{\frac{C_{\text{тр}}^{\text{стар}}}{C_{\text{реал}}^{\text{стар}}}} \right] \frac{t_{\text{тр}}}{t_{\text{сущ}}}.$$

Также после проведения преобразований в результате получаем выражение для показателя способности, учитывая стоимостные параметры:

$$\Pi_S = \left[\text{const} \cdot \Pi_{\text{эф}}^{\text{нов}} \left(1 + \frac{\Delta C^{\text{адапт}}}{C_{\text{реал}}^{\text{стар}}}\right) \right]^2 \frac{t_{\text{тр}}}{t_{\text{сущ}}}.$$

В тоже время, если учитывать параметры энергоемкости адаптированного комплекса, выражение для показателя способности будет иметь вид

$$\Pi_S = \left[\text{const} \cdot \Pi_{\text{эф}}^{\text{нов}} \left(1 + \frac{\Delta E^{\text{адапт}}}{E_{\text{реал}}^{\text{стар}}}\right) \right]^2 \frac{t_{\text{тр}}}{t_{\text{сущ}}}.$$

Таким образом, показатель способности комплекса (элемента комплекса) связывает ресурсные параметры, которым следует наделить комплекс (его элемент) при выполнении адаптации.

При анализе возможности использования оборудования комплекса на очередном этапе адаптации возможны следующие действия (рис. 2):

- оборудование может быть использовано по назначению;
- оборудование должно быть создано заново;
- оборудование должно быть подвергнуто ремонту для восстановления его работоспособности;
- оборудование должно быть адаптировано для придания ему соответствующей способности к выполнению целевых задач.

В соответствии с областями, показанными на рис. 2, необходимо ответить на следующие важные технические и финансовые вопросы:

- 1) в какой области находится тот или иной объект комплекса?
- 2) если создавать какой-то элемент комплекса заново, то как это сделать лучше?
- 3) если адаптации должны быть подвергнуты несколько элементов комплекса, то как распределить имеющиеся ресурсы между этими объектами?

Первым шагом на пути поиска ответов должен стать ответ о степени потенциальной способности комплекса (или его элемента) выполнить возложенную на него задачу и степени работоспособности уже созданного оборудования комплекса.

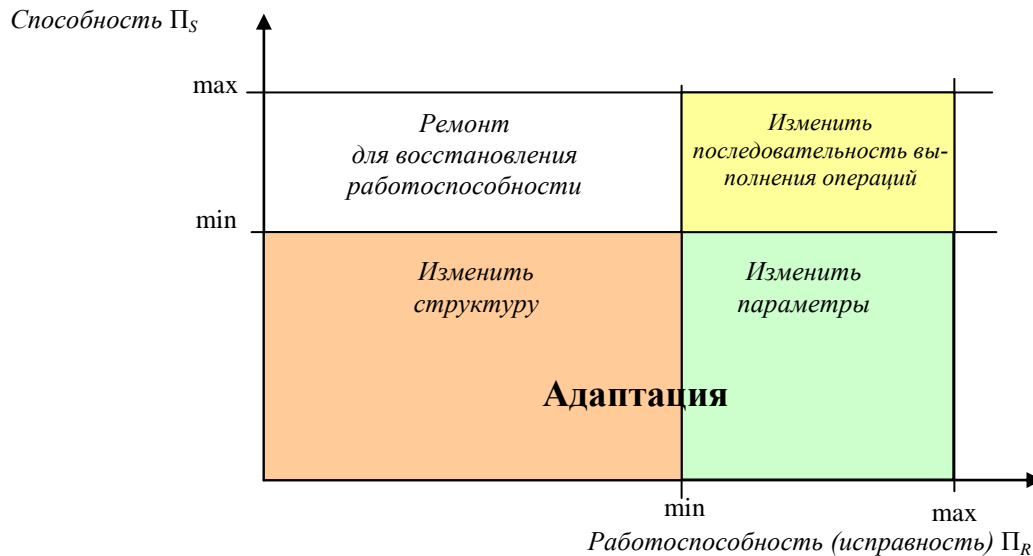


Рис. 2. Схема, отражающая способность комплекса к адаптации к деструктивным воздействиям

Работоспособность – это свойство объекта, характеризующее способность выполнять заданные функции, соответствующие требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации. Поэтому в качестве одного из аргументов показателя работоспособности может быть использована вероятность безотказной работы.

Сама вероятность безотказной работы можно выразить формулой

$$P(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau\right),$$

где t – время;

$\lambda(\tau)$ – интенсивности отказов.

Поскольку под интенсивностью отказов $\lambda(\tau)$ понимается условная плотность вероятности возникновения отказа объекта в момент времени (наработки) t , определяемая при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возник, то под отказом понимается событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.

Классическое представление о характере изменения во времени интенсивности отказов $\lambda(t)$ основано на двух положениях.

1. Исследованию подвергаются n_0 одинаковых элементов, которые испытываются через промежуток времени t , причем часть элементов $n_f(t)$ выходят из строя и другая часть $n_s(t)$ сохраняет работоспособность.

Вероятность безотказной работы в этом случае определяется как

$$P(t) = \frac{n_s(t)}{n_s(t) + n_f(t)},$$

причем $n_s(t) + n_f(t) = n_0$.

2. В технике часто используется условие $\lambda(\tau) = \text{const}$, соответствующее тому, что интенсивность отказов рассматривается как величина, обратная средней наработке на отказ.

Возрастание условного накопления износа по мере увеличения отработанного системой времени ведет к нарастанию интенсивности потока отказов, т.е. для системы на протяжении времени межремонтного цикла интенсивность отказов $\lambda(\tau) \neq \text{const}$.

Так, например, результаты обследования автоматической линии обработки деталей обобщены зависимостью

$$\lambda = \lambda_0 (1 + ct)^m,$$

где λ_0 – интенсивность потока отказов станочной системы при $t = 0$;
 c, m – коэффициент относительного приращения и показатель скорости приращения интенсивности отказов соответственно.

В каждом случае λ_0, c и m принимают определенные числовые значения.

Таким образом, зафиксирован закон надежности для станочных систем в виде

$$P(t) = e^{\left(-\lambda_0 t - \frac{\lambda_0 c}{m+1} t^{m+1}\right)}.$$

Поэтому, видимо по причине сложности в определении функции интенсивности отказов, в нормативно-технической документации по ракетной технике под отказом понимается не событие, а ситуация, которая сводится к невозможности устранения реального отказа за назначенный промежуток времени. Это подразумевает ситуацию, когда отказ был, но его удается устранить за назначенное время. Такая ситуация не воспринимается отказом.

В связи с этим можно отметить, что, во-первых, вероятностный подход к оцениванию работоспособности исследуемых объектов не показывает на причину потери работоспособности, а также пути ее устранения, а во-вторых, не содержит ресурсную составляющую поддержания работоспособного состояния объекта.

Таким образом, на основании приведенных выше рассуждений, можно использовать следующее выражение для показателя работоспособности оборудования первого приближения, архитектура которого аналогична выражению для показателя способности:

$$\Pi_R = P(t) \cdot \left(1 + \frac{\Delta C^{\text{восстанов}}}{C_{\text{реал}}^{\text{стар}}}\right) \cdot \frac{t_{\text{норм}}}{t_{\text{реал}}},$$

где $P(t)$ – вероятность безотказной работы объекта;
 $\Delta C^{\text{восстанов}}$ – ресурсы, вкладываемые в восстановление потерянной работоспособности;
 $C_{\text{реал}}^{\text{стар}}$ – ресурсы, реально потраченные на создание объекта при постановке его в войска;
 $t_{\text{норм}}$ – нормированное время на устранение отказа;
 $t_{\text{реал}}$ – время, потраченное на поиск причин и устранение отказа.

Следует отметить, что процесс восстановления работоспособности объекта $\Delta C^{\text{восстанов}}$ также является процессом адаптации, но на этапе его эксплуатации (возможно во время проведения регламентных работ). Поэтому окончательное выражение для показателя работоспособности может быть записано в виде

$$\Pi_R = P(t) \cdot \left(1 + \frac{\Delta C^{\text{адапт}}}{C_{\text{реал}}^{\text{стар}}}\right) \cdot \frac{t_{\text{норм}}}{t_{\text{реал}}}.$$

Таким образом, учитывая изложенный выше математический аппарат, можно рассчитать показатель адаптации комплекса к внешним деструктивным воздействиям, что предоставляет возможность при проектировании комплекса более широко учесть особенности эксплуатации комплекса и его взаимодействие с внешними деструктивными факторами.

Выражение для показателя адаптации представляет собой произведение показателей работоспособности комплекса Π_R и показателя его способности к решению новых (выдвинутых условиями адаптации) задач Π_S :

$$\Pi_{\text{адапт}} = \Pi_R \Pi_S.$$

Адаптация объекта к внешним деструктивным воздействиям в ходе его эксплуатации неразрывно связан с процессами его модернизации или модификации.

Процедура создания технических средств, как правило, начинается с формирования концепции как ведущего замысла, направленного на развитие этих технических средств.

Выбор приемлемой концепции является достаточно сложной задачей, которая решается внутри общей модели проблемной ситуации по созданию нового объекта и представляется в виде системы:

$$\langle S, \Lambda, G, Y, H, \Pi, \psi, K, P, \Theta \rangle,$$

- где S – множество стратегий;
 Λ – множество значений определенных и неопределенных факторов;
 G – множество исходов операции;
 Y – параметры характеристик исходов $g \in G$;
 H – отображение, ставящее в соответствие множества S и Λ количество результатов $Y(G)$;
 Π – показатель эффективности;
 ψ – оператор соответствия «результат-показатель»;
 K – критерий эффективности;
 P – модель предпочтения;
 Θ – параметры информации о проблемной ситуации.

Формальная постановка этой задачи, при принятых ранее обозначениях при описании концепции адаптации, может быть представлена в следующем виде:

$$\psi : \{Y|H : S \times \Lambda \xrightarrow{\Theta} Y(G)\} \xrightarrow{\Theta} \Pi_{\text{адапт}}.$$

Данное соотношение формально описывает алгоритм получения показателя адаптации, который завершается анализом полученного результата, описываемого соотношением

$$P \xrightarrow{\Theta} K : S \xrightarrow{\Pi_{\text{адапт}}} S^*.$$

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРЕДПОЧТЕНИЯ В РАСПРЕДЕЛЕНИИ РЕСУРСОВ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ АДАПТАЦИИ НРК

Анализ путей и результатов развития НРК, свидетельствуют о том, что основные положения адаптации НРК только начинают внедряться. Такое внедрение, к сожалению, просматривается по отдельным частным агрегатам и системам комплекса. Существующее положение дел обуславливается, с одной стороны, как сложностью элементов, так и комплекса в целом, а с другой тем, что НРК при их создании не предназначались для многократной адаптации.

Для таких больших и сложных объектов исследования одна из проблем адаптации состоит в распределении имеющихся ресурсов, выделенных на ее проведение в условиях ограниченности таких ресурсов и необходимости достижения максимального эффекта от проведения адаптации комплекса.

Как показано на рис. 2, адаптация может касаться как процессов проектирования новых агрегатов и систем, так и процессов доработки уже созданного оборудования. Поскольку процессы доработки проходят при стабильном структурно-функциональном облике комплекса, то задача об оптимальном распределении выделенных на модификацию ресурсов может быть решена при наличии разработанной системы оценивания. Математическая постановка такой задачи сводится к максимизации функции (показателя) эффективности адап-

тируемого НРК, имеющего в качестве аргументов ресурсные параметры, принадлежащие множеству вещественных чисел:

$$\max \Pi^{\text{эф}}(C), \text{ где } C \in R^n$$

при условии, что $\Pi_{\text{эф}}(C) \leq 1$, а аргументы этой функции имеют ограничения

$$0 \leq a_i \leq C_i \leq b_i; i = 1, 2, \dots, n.$$

В такой постановке поиск рационального пути адаптации НРК содержит следующие условия и ограничения.

1. Ресурс, выделяемый на адаптацию НРК существенно меньше того, который должен выделяться на создание абсолютно нового НРК:

$$C_{\text{НРК}}^{\text{адапт}} = C_{\text{НРК}} + C^{\text{адапт}} < C_{\text{НРК}}^{\text{нов}}.$$

2. Величина ресурса, выделяемого на адаптацию НРК должна быть минимально необходимой:

$$\min[C^{\text{адапт}}].$$

Адаптируемый НРК должен иметь максимальный показатель эффективности:

$$\max \left[\Pi^{\text{эф}} = \text{const} \frac{E_{\text{тр}}}{E_{\text{реал}}} \right] = \max \left[\Pi^{\text{эф}} = \text{const} \frac{C_{\text{тр}}}{C_{\text{реал}}} \right].$$

Такая формализация задачи адаптации НРК приводит к необходимости решения еще одной задачи: каким образом распределить выделенный на переоборудование НРК ресурс?

Поскольку комплекс состоит из n элементов то, весь выделенный на переоборудование ресурс должен быть распределен между его элементами следующим образом:

$$\begin{cases} C^{\text{адапт}} x_1 + C^{\text{адапт}} x_2 + \dots + C^{\text{адапт}} x_n = C^{\text{адапт}} \\ x_1 + x_2 + \dots + x_n = 1 \end{cases},$$

где x_i – доля ресурса, выделяемая на переоборудование i -го элемента комплекса.

Далее, в математическую модель необходимо внести функцию рациональности использования выделяемого ресурса $\varphi(x)$, обеспечивающую учет особенностей исследуемого объекта. Такая функция должна содержать ранг компонентов комплекса, для которых следует выделять ресурсы при проведении модификации. Выражение для этой функции имеет вид

$$\varphi_i(x_i) = r_i \cdot C^{\text{адапт}} \cdot x_i,$$

где r_i – ранг i -го элемента (его значимость).

Тогда задача о распределении ресурса по n элементам сводится к отысканию выражения

$$\min[\varphi_1(x_1) + \varphi_2(x_2) + \dots + \varphi_n(x_n)]$$

при условии, что эффективность адаптируемого НРК не будет меньше той, которую можно было бы достичь при создании совершенно нового НРК, предназначенного для таких же целей, т. е.

$$\max \left[\Pi^{\text{эф}} = \text{const} \frac{C_{\text{тр}}}{C_{\text{реал}}} \right] \quad C_{\text{тр}} \rightarrow \text{const}, \quad C_{\text{реал}} \rightarrow \text{var},$$

$$C_{\text{НРК}}^{\text{адапт}} < C_{\text{НРК}}^{\text{нов}},$$

$$C^{\text{адапт}} x_1 + C^{\text{адапт}} x_2 + C^{\text{адапт}} x_3 + \dots + C^{\text{адапт}} x_n \leq C_{\text{НРК}}^{\text{нов}}.$$

Суть задачи распределения ресурсов на адаптацию НРК составляет задачу математического программирования. Ее решение будет зависеть от вида функций $\varphi_i(x_i)$.

На основании информации о возможных исходах процессов адаптации, наглядная иллюстрация которого показана на рис. 2, можно ввести значимость (ранг) r соответствующего оборудования через отмасштабированные показатели работоспособности и способности, произведение которых, как было показано в системе предпочтения, есть показатель адаптации комплекса:

$$r_i = \frac{1}{\Pi_R^i \cdot \Pi_S^i} = \frac{1}{\Pi_E^i}.$$

Такое введение рангов соответствует следующему условию: чем ниже значения показателей работоспособности и способности, тем больше средств следует вкладывать в их модификацию. Область с самыми низкими их значениями соответствует задаче создания новых технических устройств (см. рис. 2).

В соответствии с условиями задачи и выражениями для показателей работоспособности

$$\Pi_S = \left[\text{const} \cdot \Pi_{\text{эф}}^{\text{нов}} \left(1 + \frac{\Delta C^{\text{адапт}}}{C_{\text{реал}}^{\text{стар}}} \right) \right]^2 \frac{t_{\text{тр}}}{t_{\text{сущ}}}$$

и способности оборудования

$$\Pi_R = P(t) \cdot \left(1 + \frac{\Delta C^{\text{адапт}}}{C_{\text{реал}}^{\text{стар}}} \right) \cdot \frac{t_{\text{норм}}}{t_{\text{реал}}}$$

величина $\Delta C^{\text{адапт}}$ определяется выражением

$$\Delta C^{\text{адапт}} = C^{\text{адапт}} \cdot x.$$

Таким образом, в общем виде можно записать

$$\Pi_S^i = c_1 \cdot (1 + c_2 \cdot C^{\text{адапт}} \cdot x_i)^2 \quad \text{и} \quad \Pi_R^i = c_3 \cdot (1 + c_4 \cdot C^{\text{адапт}} \cdot x_i),$$

где c_j ($j = 1 \div 4$) – некие константы.

Тогда целевая функция рациональности использования выделяемого на адаптацию ресурса имеет вид

$$\varphi_i(x) = \frac{C^{\text{адапт}} \cdot x_i}{\left[c_1 \cdot c_3 \cdot (1 + c_2 \cdot C^{\text{адапт}} \cdot x_i)^2 \cdot (1 + c_4 \cdot C^{\text{адапт}} \cdot x_i) \right]}.$$

Поскольку целевая функция нелинейная, то задача распределения ресурса при адаптации

$$f = \min [\varphi_1(x_1) + \varphi_2(x_2) + \dots + \varphi_n(x_n)];$$

$$x_1 + x_2 + \dots + x_n = 1; \quad x_i \geq 0; \quad i = 1, \dots, n$$

является задачей нелинейного программирования.

Как известно, для задач нелинейного программирования общего метода решения нет. Такие задачи решаются лишь за малым исключением, а в основном поддаются только численным методам решения, при этом глобальный экстремум не находится.

Для определения условия экстремума могут быть использованы методы дифференциального исчисления, когда целевая функция $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ может быть дважды продифференцирована.

Слагаемое функции $f(x_i)$ – достаточно гладкая функция, график которой показан на рис. 3.

Для двух аргументов этой функции $f(x_i, x_{i+1})$ (рис. 4) она также представляет приемлемую для поиска экстремума функцию.

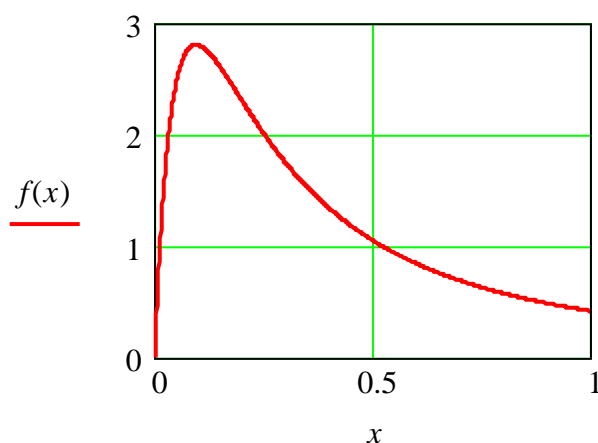


Рис. 3. Графическая зависимость для определения слагаемого функции $f(x_i)$

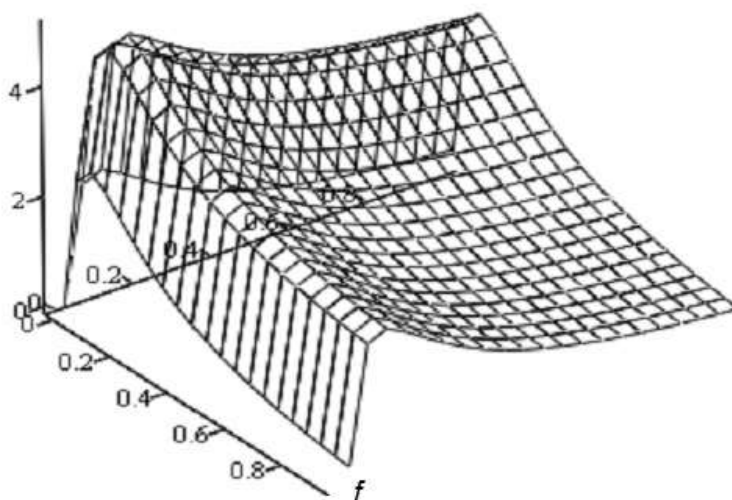


Рис. 4. Графическая зависимость для определения слагаемого функции $f(x_i, x_{i+1})$

Поэтому для многих переменных (x_i) могут быть использованы известные методы оптимизации. Например, теорема Куна – Такера, согласно которой поиск целевой функции

$$\min f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

при m ограничениях и n переменных

$$h_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0,$$

$$h_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0,$$

$$h_3(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0,$$

...

$$h_m(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0.$$

необходимо выполнение условий, при которых функции f, h_1, h_2, \dots, h_m должны быть дифференцируемы.

Для решения такой задачи оптимизации вводятся дополнительные переменные (множители Лагранжа) $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_m$ по количеству, равному числу ограничений, они входят в состав функции Лагранжа:

$$L(x_1, x_2, \dots, x_n, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \sum_{i=1}^m \lambda_i h_i(x_1, x_2, \dots, x_n).$$

После составления системы уравнений

$$\frac{\partial L(x^0, \lambda^0)}{\partial x_j} = 0, j = 1, \dots, n;$$

$$\frac{\partial L(x^0, \lambda^0)}{\partial \lambda_i} = 0, i = 1, \dots, m$$

находится решение $\bar{x}_0 = (x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$, которое приводит к решению задачи распределения ресурса при адаптации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Под управлением жизненным циклом военных технических объектов следует понимать совокупность взаимосвязанных процессов проектирования, создания и эксплуатации технического объекта, основанных на придании ему свойства адаптации [4]. Если модернизацию технического объекта можно характеризовать для некоторых элементов словом «лучше», а модификацию словом «иначе», то адаптация включает не только понятия «лучше» и «иначе», но и для некоторых элементов понятие «хуже». Вместе с тем, адаптация обеспечивает улучшение интегрального качества технического объекта.

Таким образом, адаптация в отношении уникального технического объекта является гибкой и более широкой стратегией, учитывающей современные условия.

Полученные выражения позволяют рассчитать как показатели комплекса, связанные с его адаптацией к деструктивным воздействиям, так и ресурс, необходимый для проведения этих мероприятий.

Список используемых источников

1. 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., 2012. – Т. 5: Стратегия будущего. – С. 251–254.
2. Петухов Г. Б. Теоретические основы и методы исследования эффективности оперативных целенаправленных процессов: учеб. пособие. – Л.: ВИКИ имени А. Ф. Можайского, 1979. – 176 с.
3. Рябинин И. А., Черкесов Г. Н. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем. – М.: Радио и связь, 1981. – 264 с.
4. Лагун А. В., Козлов В. В., Казахов Б. Д. Обоснование показателей для оценки результативности функционирования системы защиты ракетно-космического комплекса в условиях внешнего деструктивного воздействия // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2020. – Вып. 675. – С. 36–44.

А. В. Клепов,
кандидат технических наук, доцент;
А. Н. Степенко,
кандидат технических наук;
Д. В. Шаповалов,
кандидат технических наук

РАЗРАБОТКА ПОДХОДОВ К ОБОСНОВАНИЮ ЗАТРАТ НА ПОСТАВКУ ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ СОЗДАНИИ ИЛИ МОДЕРНИЗАЦИИ ОБЪЕКТОВ НАЗЕМНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Представлены результаты анализа подходов к оцениванию стоимости вновь создаваемого или покупаемого оборудования, используемого при создании или модернизации объектов наземной космической инфраструктуры.

С учетом специфики решаемых задач и сроков создания и модернизации существующих комплексов сформулирована и решена задача обоснования предельных затрат на заказ и поставку оборудования для строительства или реконструкции сложного технического комплекса на основе критерия соответствия закупочной стоимости оборудования оценочным (расчетным) значениям этой стоимости. С учетом реальных исходных данных проведены расчеты для определения предельной закупочной цены компрессорной установки, используемой в системе обеспечения сжатыми газами ракет космического назначения.

Ключевые слова: наземная космическая инфраструктура, методы оценивания стоимости оборудования, закупочная стоимость.

ВВЕДЕНИЕ

На этапе формирования долгосрочных планов развития наземной космической инфраструктуры (НКИ), под которой в данной работе будем понимать совокупность наземных сооружений, технологического оборудования (ТЛО) и технических систем (ТС), предназначенных для осуществления космической деятельности, одной из важных проблем является обоснование стоимостных показателей заказываемого ТЛО и ТС. Сложность ее решения связана с изменяющимися условиями заказов и поставок оборудования, вызванные ростом цен как на готовые системы, так и на их комплектующие, а также работы, выполняемые в рамках подготовки оборудования к установке и вводу в эксплуатацию.

Кроме того, на этапе формирования заказов возникают трудности при определении закупочных цен уникального или мелкосерийного оборудования из-за низкого уровня конкуренции, что не обеспечивает снижения цены в ходе определения поставщика. В случае единственного возможного поставщика может произойти формирование необоснованно высоких значений верхних лимитных цен – предельных цен, превышение которых приведет к неэффективному с военно-экономической точки зрения расходованию финансовых ресурсов.

Одним из возможных путей решения указанной проблемы при создании или модернизации объектов НКИ, обеспечивающих реализацию оборонных программ, является внедрение в практику формирования планирующих документов методического аппарата для оценки, обоснования и подготовки заключений по стоимостным показателям государственных контрактов в части продукции военного назначения, поставляемой по государственному оборонному заказу (ГОЗ). Ряд известных подходов к определению экономической обоснованности прогнозных цен на поставку оборудования может быть адаптирован к объектам НКИ и использован специалистами центральных органов военного управления при осуществлении МО РФ функций государственного заказчика.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ПОДХОДОВ

Оценивание и нормирование затрат на заказ и поставку ТЛО и ТС, с учетом требований к необходимости рационального использования ресурсов, является важнейшим элементом процесса создания и развития объектов отечественной НКИ.

Как правило, в состав объектов НКИ входит разнородное ТЛО и ТС, отличающиеся как функциональным назначением, так и заложенными в их конструкцию принципами действия. Наряду с системами, выпускающимися достаточно крупными сериями комплектующими изделиями межотраслевого потребления (КИМП), значительную долю могут составлять уникальные технические устройства, не имеющие полных аналогов с точки зрения конструктивного исполнения и реализуемых ими функций. С учетом указанных особенностей оборудования НКИ, активной политикой государства в области развития НКИ и требованиями федеральных нормативных правовых актов по обеспечению конкурентной и прозрачной системы закупок для обеспечения государственных нужд, задача обоснования затрат на заказ и поставку оборудования на основе [5] становится все более актуальной.

При выполнении мероприятий по созданию или модернизации объектов НКИ или их элементов в рамках различных государственных программ, можно выделить несколько следующих направлений деятельности заказчика, например: разработку перечней необходимого оборудования, формирование заказов для его поставки и обоснование соответствующих затрат. В рамках данной работы авторами рассмотрены подходы к решению задачи обоснования затрат на заказ и поставку ТЛО, используемого при выполнении операций технологического графика подготовки изделий на объектах НКИ. Сложность ее решения связана с тем, что цены на различные модели и модификации оборудования схожего функционального назначения могут изменяться в достаточно широком диапазоне из-за множества факторов, обусловленных разбросом имеющихся у оборудования характеристик, различиями в условиях изготовления, поставок, степени уникальности и т. д. Поэтому затраты на закупку оборудования не всегда являются рациональными в системе «ресурсоемкость – результативность» и, как следствие, не всегда соответствуют ограничениям бюджета.

На практике подобные задачи решаются в сфере оценочной деятельности, одним из основных понятий которой является оценочная стоимость (ОцС) – расчетная величина, выраженная в деньгах и представляющая собой наиболее вероятную цену, за которую товар может быть продан на рынке. Она может быть получена в результате моделирования с использованием различных подходов, которые более подробно будут рассмотрены далее. Отметим, что в рамках этой работы рассматриваются два основных подхода – сравнительный, в нем для моделирования ОцС используются цены на оборудование, и затратный, в котором для определения ОцС предполагается использование данных о затратах на создание или приобретение оборудования. Часто в процессе оценивания стоимости используется несколько подходов к оценке, в этом случае за искомую оценочную стоимость принимается результат согласования между собой результатов, полученных при использовании разных подходов.

Особенности использования указанных подходов проиллюстрируем в рамках решения следующей задачи: при заданных в условиях проекта требованиях к тактико-техническим характеристикам (ТТХ) оборудования, а также известных значениях его предполагаемой закупочной стоимости обосновать предельные затраты на заказ и поставку оборудования для создания или модернизации объекта НКИ на основе критерия соответствия закупочной стоимости оборудования оценочным значениям этой стоимости, полученным в результате расчетов.

В целях решения поставленной задачи необходимо выбрать наиболее эффективный научно-методический аппарат для расчета ОцС оборудования объектов НКИ, предполагаемого к закупке.

На объективность, точность и достоверность результатов решения задачи оценивания стоимости влияют особенности системы разработки, изготовления, приобретения и поставки

оборудования [2]. Например, для КИМП характерно значительное разнообразие видов, типов и конструктивных исполнений. В то же время, для ряда систем специального оборудования, являющихся уникальными, может отсутствовать доступная и достоверная информация о затратах на их создание и о ценах приобретения.

Поскольку КИМП, как правило, представляют собой изделия машиностроительного производства, существенную роль в формировании их себестоимости, и, как следствие, цен играют отраслевые факторы: серийность выпуска, применяемые материалы, используемые стандарты и технические требования к продукции, производственные и операционные технологии, организация производства, кооперированные связи между предприятиями. Свой вклад в процесс ценообразования вносят расходы на перевозку, монтаж, наладку оборудования и ряд внешних факторов – быстрое обновление модельного ряда, что приводит к моральному устареванию оборудования, уровень конкуренции на рынке.

Рассмотрим основные методические подходы к оценке стоимости машин и оборудования, которые могут быть использованы для решения поставленной в работе задачи, а именно: сравнительный и затратный.

Сравнительный подход – это совокупность методов оценивания стоимости оборудования, которые предполагают расчет ОцС на основе сравнения с известными ценами аналогичного оборудования. Этот подход может использоваться для расчета ОцС серийно выпускаемых КИМП. Он включает в себя несколько методов, которые предполагают либо внесение различных корректировок в стоимость объекта-аналога, либо анализ статистических данных относительно условий, при которых осуществлялись заказы и поставки аналогичного оборудования.

Учитывая специфику обоснования затрат на заказ и поставку оборудования НКИ, целесообразно рассмотреть один из методов сравнительного подхода, а именно метод сравнения с аналогичным оборудованием, в частности КИМП. В рамках этого метода, в свою очередь, можно выделить ситуации, когда производится сравнение с ранее поставляемым точным аналогом оцениваемого оборудования, а также ситуацию сравнения с аналогичным оборудованием, которое имеет отличия в характеристиках, либо условиях заказа и поставки.

Расчет ОцС КИМП методом сравнения с точными аналогами оцениваемых изделий применяется, когда в качестве аналогов рассматривается оборудование той же модели, что и объект, для которого необходимо получить ОцС. Допускаются небольшие отличия между аналогами в текущем сроке службы, техническом состоянии и комплектации.

Цены на точные аналоги служат базой для расчета стоимости оцениваемого изделия. Цены изделий-аналогов назначены разными продавцами, в разных регионах и в разное время, поэтому между ними наблюдается разброс, обусловленный влиянием рыночных факторов: ценовой политики продавцов, условий и ограничений в торговом процессе, активности рынка в разных регионах и т. д. Чтобы привести цены КИМП-аналогов к единым условиям, соответствующим условиям текущего заказа оборудования, цены аналогов подвергают корректировкам, которые можно подразделить на три группы:

- 1) корректировки в виде индексации цен аналогов к дате оценки;
- 2) корректировки, учитывающие наличие скидок или надбавок за серийность поставок КИМП-аналогов, вид их комплектации, различные дополнительные услуги и др.
- 3) корректировки, учитывающие особенности условий заказов и поставок, например, затраты на транспортировку, монтаж, наладку, наличие или отсутствие НДС в цене.

Корректировки применяют путем умножения исходной цены аналогичного КИМП на соответствующий коэффициент или индекс. Например, для пересчета исторически зафиксированной цены аналогичного оборудования в цену по состоянию на дату расчета ОцС используют индекс корректировки по фактору времени.

В этом случае производится индексация цены аналога следующим образом:

$$C_{\text{кор}} = C_0 \bar{h}^m, \quad (1)$$

где C_0 – цена аналогичного КИМП в начале интервала индексации (месяц текущего года);
 \bar{h} – среднемесячный корректирующий индекс, учитывающий динамику цены аналога по месяцам;
 m – период индексации, в месяцах.

Среднемесячный корректирующий индекс можно рассчитать по известным ценам аналога на интервале, близком к периоду индексации:

$$\bar{h} = \left(\frac{C_n}{C_0}\right)^{1/n}, \quad (2)$$

где C_0 и C_n – цены близкого аналога КИМП в начале периода (0-й месяц) и n -м месяце соответственно.

Перейдем к рассмотрению способа расчета ОцС методом сравнения оцениваемого КИМП с аналогами, имеющими параметрические различия в технических характеристиках.

Различия в параметрах оцениваемого КИМП и его аналога учитываются введением в рассмотрение коэффициентов и поправок.

Расчет цены КИМП на текущий момент может быть реализован с использованием коэффициентов и представлен в виде произведения исторически зафиксированной цены C_0 аналогичного КИМП и корректирующего коэффициента $k_{\text{кор}}$:

$$C_{\text{кор}} = C_0 k_{\text{кор}}. \quad (3)$$

Коэффициент $k_{\text{кор}}$ учитывает различия сравниваемых объектов в определяющих параметрах (например, мощность или производительность), имеющих значения X_0 у аналогичного КИМП и X – у изделия, для которого выполняется расчет ОцС:

$$k_{\text{кор}} = \left(\frac{X}{X_0}\right)^b. \quad (4)$$

В этой формуле показатель степени b – это коэффициент торможения, учитывающий влияние отклонения параметра X на ОцС.

Коэффициент торможения в рассматриваемом случае может быть вычислен через отношение цен C_1 и C_2 двух аналогичных КИМП и отношение значений определяющих параметров X_1 и X_2 :

$$b = \frac{\lg\left(\frac{C_2}{C_1}\right)}{\lg\left(\frac{X_2}{X_1}\right)}. \quad (5)$$

В рамках рассматриваемого подхода, при наличии достаточных статистических данных о ценах аналогичных КИМП и соответствующих им значениях определяющих параметров, также могут быть использованы методы регрессионного анализа и получено уравнение, в котором показатель степени также является коэффициентом торможения:

$$C_{\text{кор}} = aX^b. \quad (6)$$

Расчет ОцС с использованием поправок заключается в добавлении (вычитании) к исторически зафиксированной цене C_0 аналогичного КИМП некоторой абсолютной величины ε :

$$C_{\text{кор}} = C_0 + \varepsilon. \quad (7)$$

Поправка к цене аналогичного КИМП может быть вычислена на основании данных о ценах и параметрах двух других аналогов или с привлечением информации еще об одном аналоге:

$$\varepsilon = \frac{C_2 - C_1}{X_2 - X_1} (X - X_0). \quad (8)$$

В этой формуле отношение разности цен C_2 и C_1 любых аналогичных КИМП к разности значений соответствующих параметров X_2 и X_1 характеризует чувствительность цены КИМП к изменению его параметра.

Также как и в случае с коэффициентной параметрической корректировкой, при внесении параметрических поправок могут быть использованы методы регрессионного анализа и получено линейное уравнение

$$C_{\text{кор}} = a + bX_0. \quad (9)$$

В выражении (9) параметр b играет роль коэффициента чувствительности, представленного в предыдущей формуле отношением разностей цен и параметров аналогичных КИМП.

Исходя из представленных соотношений, параметрические корректировки с использованием коэффициентов применяются, если принимается допущение об отсутствии линейной связи ОцС КИМП и значения его определяющего параметра, в противном случае могут использоваться параметрические поправки.

В случае, когда требуется учесть различие в комплектациях оцениваемого КИМП и его аналога, обычно используются поправки.

Затратный подход представляет собой совокупность методов оценивания стоимости оборудования на основе определения затрат, требуемых для создания или приобретения оборудования. Этот подход включает в себя различные методы, которые позволяют определить затраты на создание или приобретение точной копии оцениваемого объекта, либо объекта, имеющего схожее функциональное назначение. Методы затратного подхода наиболее востребованы, когда объектом расчета ОцС выступает уникальное оборудование, изготавливаемое по специальным проектам, например, элементы уникальных комплексов военного назначения.

Затратный подход включает в себя методы расчета ОцС, при использовании которых основными исходными данными является информация о затратах на производство и приобретение технического объекта. Это является главным отличительным признаком затратного подхода от сравнительного, где оперируют главным образом исторически зафиксированными ценами аналогичных изделий. В дальнейшем, в рамках рассмотрения затратного подхода, при указании оборудования, в отношении которого производится оценивание стоимости, будем полагать, что к такому оборудованию относится и уникальное оборудование, не имеющее полных аналогов, но содержащее отдельные элементы, в отношении которых имеется информация о затратах на их изготовление или приобретение.

Методы рассматриваемого подхода предполагают определение полной стоимости оборудования в состоянии «как новый». Полная стоимость отражает затраты на воспроизводство, но строго им не равна. В некоторых случаях при оценке ТлО, находящегося в состоянии готовности к эксплуатации, при расчете итогового результата необходимо учитывать также сопутствующие затраты или стоимость работ и услуг, необходимых для ввода изделия в эксплуатацию. Например, для ТлО характерны затраты на доставку оборудования, подготовку промышленных площадок, монтажные, пусконаладочные работы, автономные и комплексные испытания. Методы расчета ОцС, основанные на оценивании необходимых для создания и приобретения затрат, могут быть применены в отношении практически любого оборудования. Более того, если речь идет о расчете ОцС уникального оборудования, то в этом случае могут быть применены только затратные методы.

Затратные методы делят на методы определения прямых затрат, а также методы, основанные на способах косвенного определения затрат [2].

Методы определения прямых затрат основаны на оценивании следующих составляющих затрат, которые несет заказчик: базовая цена завода-изготовителя C_B , торговая наценка диле-

ра или посредника $C_{ТН}$, покупная цена нового оборудования $C_{П}$, суммарные затраты на транспортировку технического объекта к месту монтажа $C_{Тр}$, затраты на установку $C_{У}$, монтаж и сборку $C_{МС}$, пусконаладочные $C_{ПНР}$ и погрузочно-разгрузочные работы $C_{ПРР}$, косвенные затраты $C_{К}$ заказчика, учитывающие разного рода налоги, регистрационные и лицензионные платежи и пр. Таким образом, при использовании этого метода определения затрат необходимо оценить семь приведенных выше компонент. Тогда суммарные затраты можно представить в виде формулы расчета стоимости воспроизводства/замещения:

$$C_{В}(C_{З}) = C_{П} + C_{Тр} + C_{ПРР} + C_{МС} + C_{У} + C_{ПНР} + C_{К}, \quad (10)$$

где $C_{П} = C_{Б} + C_{ТН}$ при приобретении оборудования через торговых посредников.

Методы, основанные на способах косвенного определения затрат, включают в себя:

- эмпирический метод;
- метод удельных показателей затрат;
- индексно-трендовый метод.

Эмпирический метод применяется, когда отсутствует стоимостная информация по оцениваемому объекту, но в то же время имеются сведения о стоимости сходных объектов, отличающихся в ряде характеристик. В некоторой степени, предлагаемый способ расчета похож на способ введения корректировок по параметрам, применяемый в сравнительном подходе, однако необходимо учитывать, что в сравнительном подходе в качестве исходных данных используется информация о ценах аналогов, в данном же случае используются данные о затратах на изготовление. Поэтому при проведении расчетов эти различия необходимо учитывать.

Например, если в качестве основного ценообразующего параметра выбирается мощность системы, то для оценивания затрат может быть использована эмпирическая формула [2], позволяющая приблизительно оценить себестоимость оцениваемой системы $C_{А}$ с мощностью $W_{А}$ по известным данным о себестоимости аналога $C_{В}$, имеющей мощность $W_{В}$:

$$\frac{C_{А}}{C_{В}} = \left(\frac{W_{А}}{W_{В}}\right)^x. \quad (11)$$

Здесь x – коэффициент торможения, значения которого принимаются из диапазона от 0,4 до 1. Для большинства расчетов подходят значения из середины этого интервала. В качестве примера приведем некоторые обобщенные данные о значениях этого коэффициента, указанные в табл. 1

Таблица 1

**Значения коэффициента торможения
электрохимического оборудования**

Наименование оборудования	Значения коэффициента
Насосы	0,45-0,65
Электродвигатели	0,7
Электростанции	0,65-0,8
Паротурбинные установки	0,6-0,8

Метод удельных показателей затрат основан на использовании линейной зависимости между затратами и значениями определяющих показателей (если такая связь существует). Тогда значение удельного показателя затрат $C_{Уд}$ определится как отношение затрат на создание технического объекта ($C_{З}$) к значению определяющего показателя X .

К определяющим показателям относятся такие, изменение которых приводит к однозначному изменению себестоимости изготовления машины (например масса и объем изделия).

Если имеется возможность сформировать выборку, состоящую из n аналогичных технических объектов с известными себестоимостями и значениями определяющих показателей, тогда можно рассчитать среднее значение удельного показателя затрат:

$$\bar{C}_{уд} = \frac{\sum_{i=1}^n C_{удi}}{n}. \quad (12)$$

Среднее значение удельного показателя должно быть исследовано на устойчивость, для чего применяются формулы для расчета дисперсии выборки:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (C_{удi} - \bar{C}_{уд})^2}{n-1} \quad (13)$$

и соответствующего коэффициента вариации:

$$V = \frac{s}{\bar{C}_{уд}}. \quad (14)$$

Среднее значение удельного показателя затрат может быть принято для дальнейших расчетов, если V укладывается в допустимые границы. В противном случае состав выборки необходимо изменить и повторить вышеприведенную процедуру.

Перейдем к рассмотрению индексно-трендового метода, который также часто называют методом индексации.

В индексно-трендовых методах применяется единая расчетная процедура, предполагающая пересчет стоимости объекта оценки, которая содержится в документах учета в стоимость на дату проведения расчетов.

В соответствии с этой процедурой текущее значение затрат определяется как произведение исторически зафиксированной стоимости C_0 затрат на создание рассматриваемого технического объекта или аналогичного ему объекта, а также корректирующего индекса I_k :

$$C_T = C_0 I_k. \quad (15)$$

Здесь

$$I_k = I_t / I_0, \quad (16)$$

где I_0 – базисный ценовой индекс на дату фиксации первоначальной стоимости объекта;

I_t – базисный ценовой индекс на дату проведения расчетов.

В формулах (15) и (16) дата включает в себя месяц и год. Федеральная служба государственной статистики в своих информационных источниках регулярно публикует индексы цен приобретения оборудования инвестиционного назначения по годам [1, 4], на основании которых несложно рассчитать базисные ценовые индексы.

Если стоит задача расчета стоимости затрат на дату с точностью до месяца, тогда можно получить среднемесячный прирост базисного ценового индекса и уточнить полученное решение. Для этого необходимо среднемесячный прирост умножить на порядковый номер месяца, в котором производится оценка затрат. Соответствующие формулы для расчета приведены в [3].

В табл. 2 содержатся результаты расчета цепных индексов цен на продукцию машиностроения, годовые базисные индексы, а также среднемесячные приросты базисного ценового индекса в пределах каждого года. Они могут использоваться в расчетах затрат на создание и приобретение планируемого к заказу оборудования. Во втором столбце табл. 2 представлены индексы цен по данным Росстата, а в третьем, четвертом и пятом – расчетные индексы цен, полученные авторами.

Ниже, на рис. 1 и 2, приведена графическая интерпретация этих данных. Кроме того, представленное на рис. 2 уравнение линии тренда годового базисного индекса может быть использовано в расчетах и избавляет от необходимости использования таблицы. Полученное для этого уравнения значение достоверности аппроксимации 0,9912 подтверждает обоснованность

ванность полученных коэффициентов и позволяет ими пользоваться при проведении расчетов. При проведении расчетов с использованием уравнения линии тренда необходимо обратить внимание на то, что из-за особенностей алгоритма аппроксимации, при подстановке значения x , необходимо указывать не абсолютные значения годов (1995, 1996, ..., 2019, 2020), а их порядковый номер в представленной выборке, т. е. 1, 2, ..., 25, 26.

Таблица 2

Индекс цен приобретения машин и оборудования инвестиционного назначения по Российской Федерации в 1995–2020 гг.

Год	Индекс цен (декабрь текущего/декабрь предыдущего года), %	Годовой цепной индекс на конец декабря	Годовой базисный индекс на конец декабря	Среднемесячный прирост базисного ценового индекса
1995	295,0	2,95	2,95	-
1996	123,3	1,233	3,63735	0,057279
1997	108,0	1,08	3,928338	0,024249
...
...
2013	103,1	1,031	25,401	0,0636
2014	112,3	1,123	28,525	0,2603
2015	120,1	1,201	34,259	0,4778
2016	97,8	0,978	33,505	-0,0628
2017	101,1	1,011	33,874	0,0307
2018	108,9	1,089	36,888	0,2512
2019	107,1	1,071	39,507	0,2182
2020	109,3	1,093	43,182	0,3061

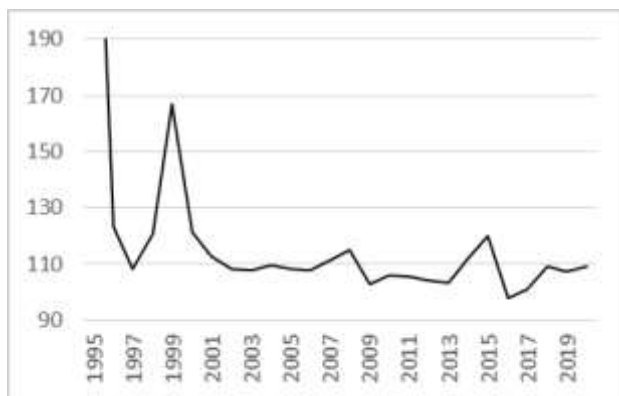


Рис. 1. Динамика индекса цен приобретения оборудования инвестиционного назначения

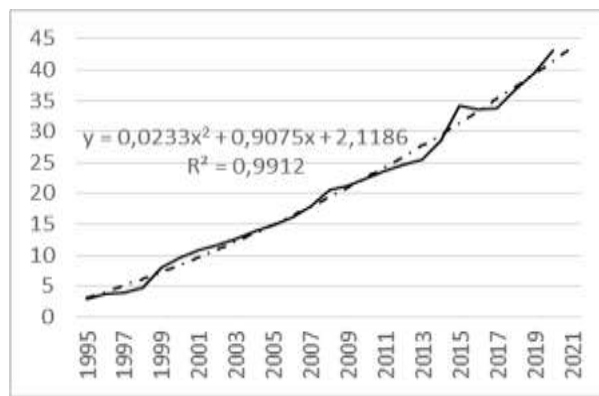


Рис. 2. Динамика годового базисного индекса цен приобретения оборудования инвестиционного назначения

Все рассмотренные в работе подходы и входящие в них методы могут быть использованы для получения ОцС как отдельно, так и в комплексе. В последнем случае применение каждого метода дает некоторое промежуточное значение ОцС одного и того же оборудования. Все промежуточные значения в итоге должны быть между собой согласованы и в результате должна быть получена итоговая величина ОцС.

В существующих нормативных документах в области оценочной деятельности не устанавливается приоритет какого-либо подхода и отсутствуют требования необходимости одновременного использования всех известных подходов к оценке. Таким образом, задача лица, производящего оценивание стоимости – обосновать выбор определенного подхода (или подходов), для использования которого имеется возможность получения достоверной информации, а также имеется возможность получения достоверного итогового результата оценки.

РАСЧЕТ ПРЕДЕЛЬНЫХ ЗАТРАТ НА ПОКУПКУ ОБОРУДОВАНИЯ

Приведем пример решения поставленной в работе задачи затратным методом для следующих исходных данных.

Для проведения работ по модернизации системы обеспечения сжатыми газами стартового комплекса ракеты космического назначения среднего класса необходимо закупить компрессорную установку модели КУ-131 или аналогичную, удовлетворяющую требованиям, предъявляемым к значениям ТТХ. Поставщик предлагает приобрести это оборудование за 6 000 000 руб. Заказчику требуется обосновать предельные затраты на приобретение компрессорной установки модели КУ-131 на 1 июля 2020 г. с возможностью их коррекции в пределах 3%.

Исторически зафиксированная балансовая стоимость аналогичной компрессорной установки модели КУ-131, приобретенной и поставленной на учет 15 октября 2018 г., равна 5 151 068 руб.

С использованием затратного метода проведем следующие расчеты.

Находим базисный ценовой индекс на дату приобретения:

$$I_t = I_{(12.19)} + \Delta I_{(20)} \cdot n_{(07.20)} = 39,507 + 0,3061 \cdot 7 = 41,6497,$$

где $I_{(12.19)}$ – годовой базисный индекс в конце года, предшествующего году закупки нового оборудования (2019 г.);

$\Delta I_{(20)}$ – среднемесячный прирост базисного ценового индекса в текущем году закупки (2020 г.);

$n_{(07.20)}$ – количество месяцев на дату закупки (июль – 7-й месяц 2020 г.).

Вычисляем базисный ценовой индекс на дату записи балансовой стоимости полного аналога:

$$I_0 = I_{(12.17)} + \Delta I_{(18)} \cdot n_{(20)} = 33,874 + 0,2512 \cdot 10 = 36,386,$$

где $I_{(12.17)}$ – годовой базисный индекс в конце года, предшествующего году закупки аналога (2017 г.);

$\Delta I_{(20)}$ – среднемесячный прирост базисного ценового индекса в текущем году закупки (2018 г.);

$n_{(10.18)}$ – количество месяцев на дату закупки аналога (октябрь – 10-й месяц 2018 г.).

Получаем корректирующий индекс:

$$I_K = 41,6497 / 36,386 = 1,14466.$$

Предельные затраты на 1 июля 2020 г. составляют

$$C_T = C_0 I_k = 5\,151\,068 \cdot 1,14466 = 5\,896\,221 \text{ руб.}$$

С учетом допустимой коррекции 3%, что составляет 176886 руб., предлагаемая поставщиком цена может быть принята как допустимая.

Чтобы рассчитать предельные затраты на 2021 г. в условиях, когда данные Росстата на текущий год еще не опубликованы (они будут опубликованы только в конце года), для прогнозирования роста базисного индекса и его среднемесячного прироста можно воспользоваться полученным регрессионным уравнением.

Тогда в соответствии с уравнением $y = 0,0233x^2 + 0,9075x + 2,1186$ можно спрогнозировать, что среднее прогнозное значение базисного ценового индекса на конец 2021 г. составит

$$I_{(12.21)} = 0,0233 \cdot 27^2 + 0,9075 \cdot 27 + 2,1186 = 43,6068.$$

Здесь из-за особенностей алгоритма аппроксимации полагается $x = 27$, что соответствует показателю 2021 г. и его порядковому номеру в ряду начиная с 1995 г.

Прогнозируемое значение среднемесячного прироста базисного ценового индекса в 2021 г. составит

$$\Delta I_{(21)} = (I_{(12.21)} - I_{(12.20)})/12 = (43,6068 - 43,182) / 12 = 0,0354.$$

Если по условию задачи дата закупки запланирована на 01 июля 2021 г., тогда базисный ценовой индекс на планируемую дату приобретения будет равен

$$I_t = I_{(12.20)} + \Delta I_{(21)} \cdot n_{(07.21)} = 43,182 + 0,0354 \cdot 7 = 43,4298.$$

Корректирующий индекс составит $I_k = 43,182 / 36,386 = 1,186775$, а прогнозируемое значение предельных затрат – $C_T = 5\,151\,068 \cdot 1,186775 = 6\,113\,159$ руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа научно-методического обеспечения, применяемого в сфере оценки общепромышленного оборудования, выявлены особенности рассмотренных подходов и определены наиболее эффективные методы обоснования затрат на заказ и поставку ТЛО и ТС при проведении работ на объектах НКИ. Приведены результаты расчета затратным методом предельной цены компрессорной установки, входящей в состав ТЛО и используемой при проведении операций по подготовке и пуску ракет космического назначения.

Представленные результаты могут быть использованы в органах военного управления, участвующих в реализации МО РФ функций государственного заказчика, например, специалистами департамента аудита государственных контрактов МО РФ при обосновании цены государственных контрактов и проверке обоснованности расходов на государственную программу вооружения.

Список используемых источников

1. Индексы цен приобретения машин и оборудования инвестиционного назначения по Российской Федерации в 1995–2020 гг. // Федеральная служба государственной статистики. – URL: <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/lslzh41W/tab12.xlsx> (дата обращения: 01.09.2021).
2. Касьяненко Т. Г., Маховикова Г. А. Оценка стоимости машин и оборудования: учебник и практикум. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во «Юрайт», 2015. – 495 с.

3. Оценка машин и оборудования: учебник / М. А. Федотова [и др.]; под ред. М. А. Федотовой. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ИНФРА-М, 2021. – 324 с.
4. Средние потребительские цены на отдельные виды товаров и услуг // Федеральная служба государственной статистики. – URL: <https://rosstat.gov.ru/price?print=1> (дата обращения: 01.09.2021).
5. Об утверждении концепции повышения эффективности бюджетных расходов в 2019-2024 годах: распоряжение Правительства РФ от 31 января 2019 г. №117-р. // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/552277878> (дата обращения: 22.10.2021).

В. И. Крыжановский,
кандидат технических наук, доцент;
С. В. Слатов;
И. А. Трофимов,
кандидат технических наук

ИТЕРАЦИОННЫЙ АЛГОРИТМ ОПТИМАЛЬНОГО ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ УПРАВЛЕНИЯ РАЗВОРОТОМ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Разработан итерационный алгоритм оптимального по быстродействию управления разворотом космического аппарата дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ) с целью наведения аппаратуры наблюдения на одиночный объект, расположенный на земной поверхности. По окончании разворота должно обеспечиваться равенство углов и угловых скоростей линии визирования аппаратуры наблюдения и линии направления на цель для предотвращения сдвига изображения. Приведены численные результаты моделирования, подтверждающие возможность реализации разработанного алгоритма.

Ключевые слова: замкнутый алгоритм управления, оптимальный по быстродействию разворот, космический аппарат, наведение на цель, дистанционное зондирование Земли.

ВВЕДЕНИЕ

Для обеспечения требуемого качества наблюдения за объектами на поверхности Земли необходима аппаратура наблюдения, массогабаритные характеристики которой соизмеримы с массогабаритными характеристиками КА ДЗЗ, поэтому чаще всего наведение аппаратуры на объект наблюдения производится путем разворота корпуса КА ДЗЗ. Для наблюдения за несколькими объектами в процессе полета необходимо минимизировать время переориентации аппаратуры наблюдения с текущего объекта наблюдения на последующий, поэтому требуется обеспечить оптимальное по быстродействию управление угловым движением КА ДЗЗ.

Из теории автоматического управления известно [4], что эта задача решена для случая, когда известны значения угловых параметров в начальной и конечной точках разворота, а угловая скорость в конечной точке равна нулю. При движении КА ДЗЗ по орбите происходит изменение угла и угловой скорости линии визирования на цель, поэтому определить время разворота и угловые параметры в конечной точке, которые зависят от множества факторов, в момент начала разворота достаточно сложно. Для предотвращения сдвига изображения необходимо, чтобы угловая скорость КА ДЗЗ равнялась угловой скорости линии визирования на цель, которая вследствие непрерывного движения КА ДЗЗ по орбите не является нулевой.

В работах [1–3] решалась задача определения оптимальной траектории КА ДЗЗ для этих условий. Найденные решения предполагали определение необходимых параметров углового разворота в нулевой момент времени и формирование управления по разомкнутой схеме. При таком управлении несоответствие фактических параметров КА ДЗЗ расчетным значениям, а также влияние неизбежных возмущающих воздействий приводят к существенным отклонениям по углу и угловой скорости в конечной точке от требуемых значений. В данной работе предложен алгоритм оптимального по быстродействию управления по замкнутой схеме.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Необходимо сформировать алгоритм оптимального по быстродействию управления угловым движением КА ДЗЗ по углу тангажа. КА ДЗЗ представляет собой жесткое тело, известны момент инерции J , максимально возможный управляющий момент M_m , максимально допустимая угловая скорость разворота $\dot{\vartheta}_m$. Известны угол $\vartheta_0 = \vartheta(0)$ и угловая скорость $\dot{\vartheta}_0 = \dot{\vartheta}(0)$ в начальной точке, а также закон изменения угла $\vartheta_{\text{ц}}(t)$ и угловой скорости $\dot{\vartheta}_{\text{ц}}(t)$ линии направления на цель. КА ДЗЗ движется по круговой орбите на высоте h с линейной скоростью V . Известно расстояние l от проекции КА ДЗЗ на поверхность Земли в момент времени $t=0$ до цели. Необходимо развернуть КА ДЗЗ таким образом, чтобы обеспечить выполнение граничных условий:

$$\vartheta(t_k) = \vartheta_{\text{ц}}(t_k), \dot{\vartheta}(t_k) = \dot{\vartheta}_{\text{ц}}(t_k), \quad (1)$$

а также минимизировать время t_k .

Дифференциальное уравнение углового движения КА ДЗЗ по углу тангажа имеет вид

$$J\ddot{\vartheta} = M \quad (2)$$

где M – управляющий момент.

При оптимальном по быстродействию управлении к КА ДЗЗ прикладывается только максимальное значение момента M_m , поэтому дифференциальное уравнение (2) может быть записано в виде

$$\ddot{\vartheta} = \pm \varepsilon_0, \text{ где } \varepsilon_0 = \frac{M_m}{J}. \quad (3)$$

Для дифференциального уравнения (3) динамика углового движения КА ДЗЗ на фазовой плоскости описывается уравнениями:

$$0,5\dot{\vartheta}^2 \mp \varepsilon_0\vartheta = C_1 \quad (4)$$

при максимальном управляющем моменте, а при нулевом управляющем моменте представляет собой прямую линию, параллельную оси абсцисс:

$$\dot{\vartheta} = C_2,$$

где C_1, C_2 – произвольные постоянные, зависящие от начальных условий.

Уравнения движения линии направления на цель получены в работе [2]:

$$\vartheta_{\text{ц}}(t) = \arctg \frac{l-Vt}{h}, \dot{\vartheta}_{\text{ц}}(t) = \frac{-Vh}{h^2 + (l-Vt)^2}. \quad (5)$$

ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИИ КА

Фазовая траектория трехэтапного разворота, соответствующая оптимальному по быстродействию управлению объектом (2), которое обеспечивает выполнение условий (1), приведена на рис. 1.

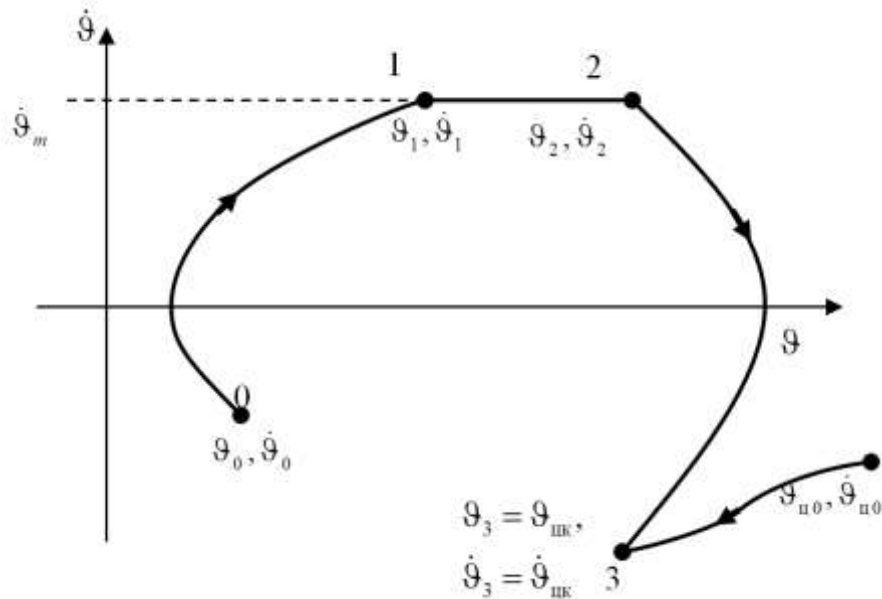


Рис. 1. Оптимальное по быстродействию управление

Разворот производится в два этапа, если выполняется условие

$$|\dot{\vartheta}_1| \leq \dot{\vartheta}_m. \quad (6)$$

При двухэтапном развороте выполняются соотношения:

$$t_{12} = 0, \vartheta_2 = \vartheta_1, \dot{\vartheta}_2 = \dot{\vartheta}_1. \quad (7)$$

В работе [2] разработан итерационный алгоритм расчета оптимального по быстродействию разворота КА, позволяющий производить вычисление времени разгона t_{01} , движения по инерции t_{12} и торможения t_{23} . Для проверки выполнения условия (6) получена формула

$$\dot{\vartheta}_1 = \sqrt{0,5(\dot{\vartheta}_0^2 + \dot{\vartheta}_{\text{шк}}^2) + \varepsilon_0(\vartheta_{\text{шк}} - \vartheta_0)}. \quad (8)$$

Упрощенная блок-схема алгоритма показана на рис. 2.

С помощью этого алгоритма формируется требуемая траектория и осуществляется управление по разомкнутой схеме. Такое управление обеспечивает разворот с заданной точностью по углу и угловой скорости при условии равенства расчетных и фактических параметров КА ДЗЗ и отсутствии возмущающих воздействий. При наличии возмущающих воздействий предпочтительным является управление по замкнутой схеме, при котором на фазовой плоскости формируется так называемая линия переключения, а управляющее воздействие зависит от фактических значений угла и угловой скорости.

На первом этапе осуществляется разгон КА, на втором этапе в общем случае – движение по инерции с максимально допустимой угловой скоростью, по достижении линии переключения на третьем этапе – торможение. В момент достижения конечной точки двигателя выключаются.

Формирование линии переключения для рассматриваемого объекта подробно изложено в литературе по теории автоматического управления для случая заданного значения угла и нулевой угловой скорости в конечной точке. Линия переключения для случая ненулевой угловой скорости в конечной точке и двухэтапного разворота показана на рис. 3.

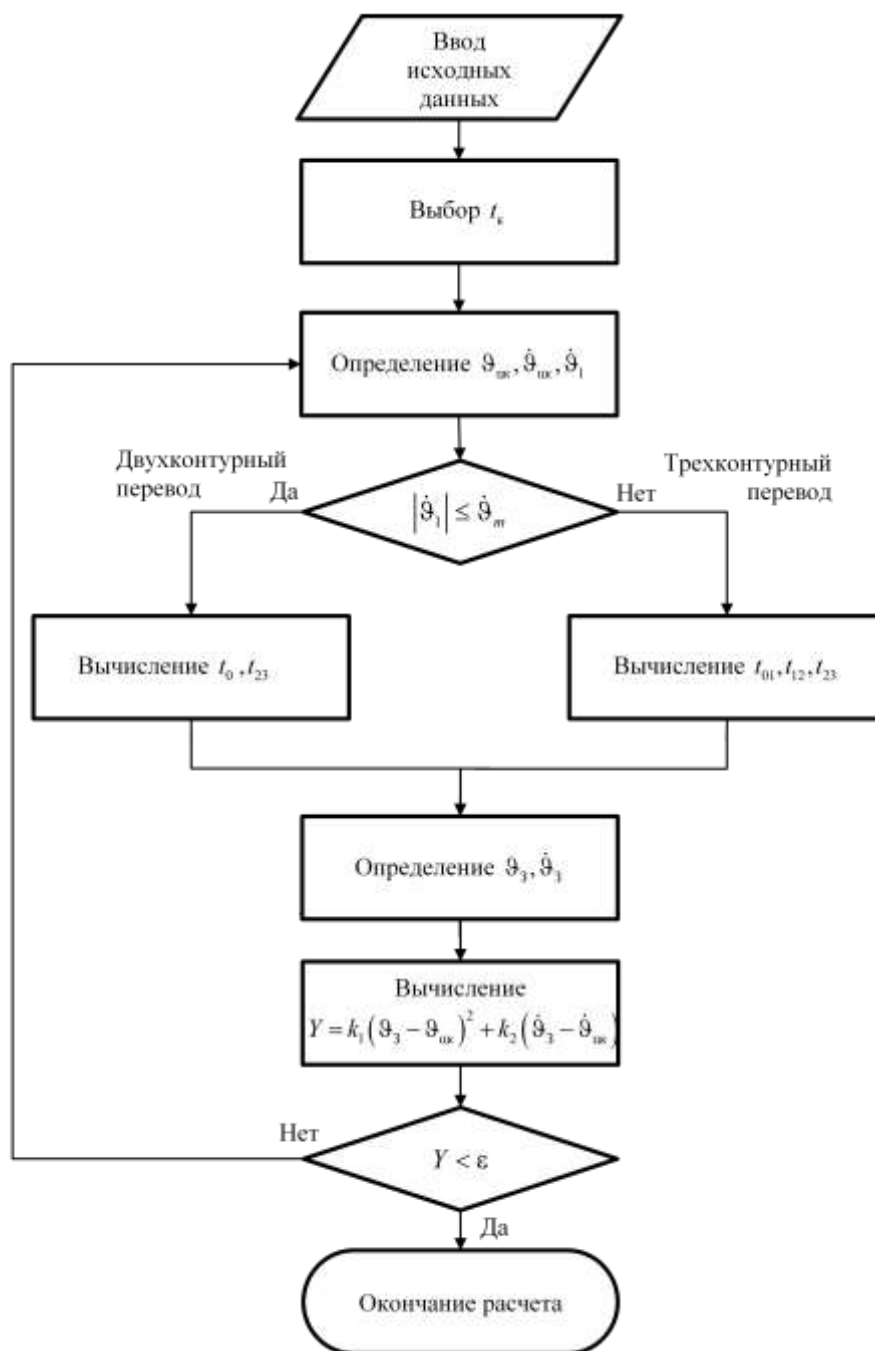


Рис. 2. Упрощенная блок-схема итерационного алгоритма

На рис. 3 изображена также фазовая траектория разворота КА из нулевой точки в конечную точку. На первом этапе выполняется разгон, затем по достижении линии переключения – торможение, причем на втором этапе изображающая точка движется по линии переключения.

Для получения уравнения линии переключения воспользуемся соотношениями (3). Верхняя часть линии переключения представляет собой фазовую траекторию, которая соответствует управляющему моменту $-M_m$ и проходит через конечную точку, поэтому ее уравнение имеет вид

$$0,5\dot{\vartheta}^2 + \varepsilon_0\vartheta = 0,5\dot{\vartheta}_{ик}^2 + \varepsilon_0\vartheta_{ик} . \tag{9}$$

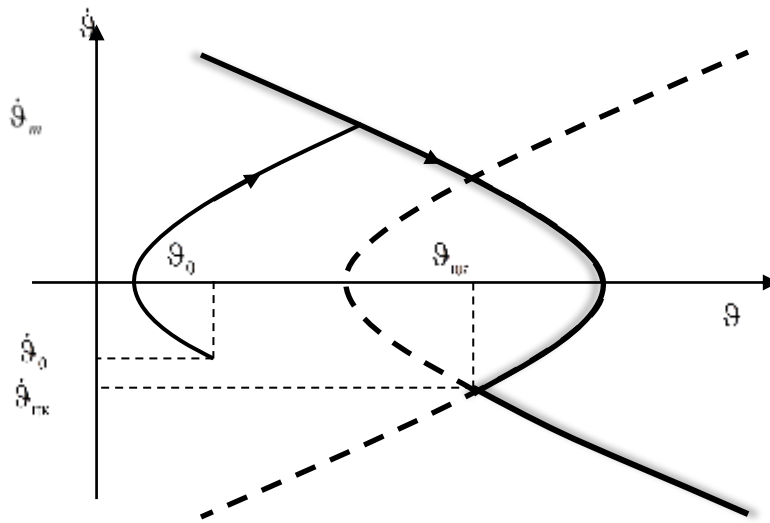


Рис. 3. Линия переключения для двухэтапного разворота

Нижняя часть линии переключения соответствует управляющему моменту M_m и также проходит через конечную точку, поэтому ее уравнение имеет вид

$$0,5\dot{\vartheta}^2 - \varepsilon_0\vartheta = 0,5\dot{\vartheta}_{\text{ук}}^2 - \varepsilon_0\vartheta_{\text{ук}}. \quad (10)$$

Анализ уравнений (9) и (10) показывает, что общая линия переключения описывается уравнением

$$\varepsilon_0(\vartheta - \vartheta_{\text{ук}}) = -0,5(\dot{\vartheta}^2 - \dot{\vartheta}_{\text{ук}}^2)\text{sign}(\dot{\vartheta} - \dot{\vartheta}_{\text{ук}}). \quad (11)$$

Введем в рассмотрение функцию переключения:

$$f = -\left[\varepsilon_0(\vartheta - \vartheta_{\text{ук}}) + 0,5(\dot{\vartheta}^2 - \dot{\vartheta}_{\text{ук}}^2)\text{sign}(\dot{\vartheta} - \dot{\vartheta}_{\text{ук}})\right]. \quad (12)$$

На фазовой плоскости для всех точек, расположенных левее линии переключения, функция переключения будет отрицательна, для точек, расположенных правее линии переключения – положительна, поэтому управляющий момент необходимо формировать в соответствии с выражением

$$M = M_m \text{sign } f. \quad (13)$$

Пример 1.

При $t = 0$ угол наклона линии визирования равен $3,81^\circ$, угловая скорость равна $-1,39^\circ/\text{с}$, высота орбиты $h = 300$ км, линейная скорость движения по орбите $V = 7,3$ км/с, максимально допустимая угловая скорость $2^\circ/\text{с}$, расстояние до цели по поверхности Земли 70 км.

По формуле, полученной в работе [2], находим начальное приближение для длительности переходного процесса t_k , оно равно 6,308 с. Используем это приближение для итерационного алгоритма, блок-схема которого изображена на рис. 2, и в результате его решения получаем:

$$t_{01} = 3,157 \text{ с}, t_{12} = 0 \text{ с}, t_{23} = 3,154 \text{ с}, t_k = 6,303 \text{ с}, \vartheta_{\text{ук}} = 4,56^\circ, \dot{\vartheta}_{\text{ук}} = -1,385^\circ/\text{с}.$$

После подстановки численных значений уравнения линии переключения (11) и функции переключения (12) принимают вид:

$$0,955(\vartheta - 4,56) = -0,5(\dot{\vartheta}^2 - 1,918)\operatorname{sgn}(\dot{\vartheta} + 1,385),$$

$$f = -\left[0,955(\vartheta - 4,56) + 0,5(\dot{\vartheta}^2 - 1,918)\operatorname{sgn}(\dot{\vartheta} + 1,385)\right].$$

Процессы на фазовой плоскости показаны на рис. 4.

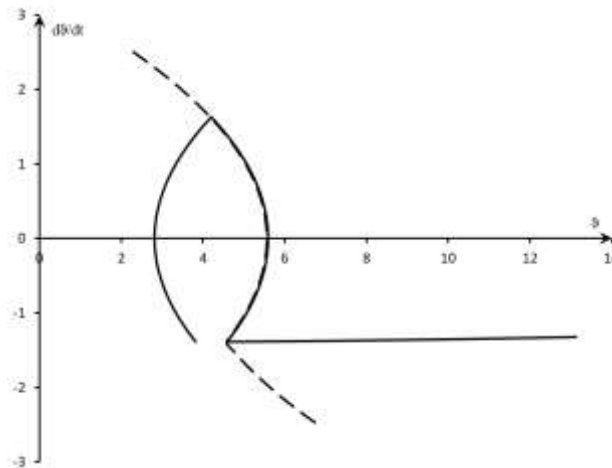


Рис. 4. Двухэтапный разворот

Фазовая траектория трехэтапного разворота приведена на рис. 5. Линия переключения для этапа торможения ничем не отличается от линии переключения для двухэтапного разворота. Участок движения по инерции начинается в момент достижения максимально допустимой угловой скорости, однако вследствие различных причин, в том числе и погрешностей датчиков угловой скорости, достичь идеального равенства фактической угловой скорости и требуемой максимально допустимой невозможно. Предполагаем, что при работе реальной системы движение по инерции должно происходить в коридоре шириной $\pm \varepsilon_f$ (рис. 5), где ε_f – достаточно малая величина, определяемая условиями эксплуатации КА.

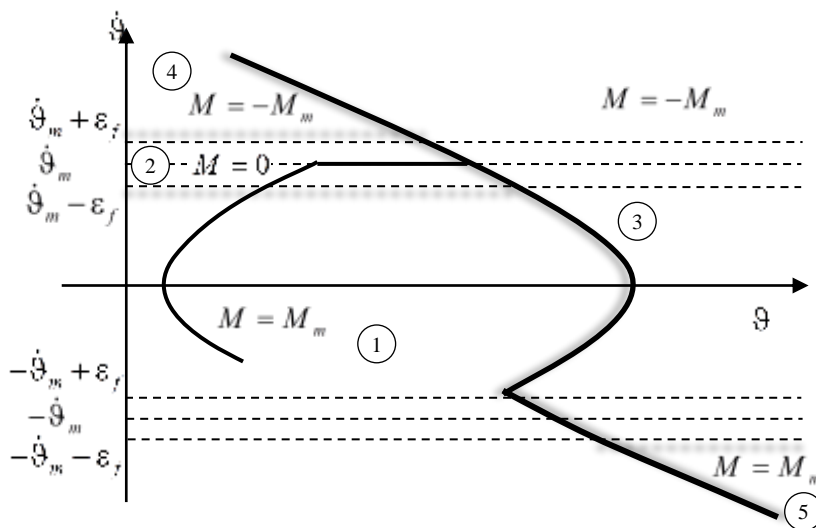


Рис. 5. Деление на области при трехэтапном развороте

На рис. 5 фазовая плоскость штриховкой разделена на пять областей, в каждой из которых указан требуемый управляющий момент, зависящий от значения основной функции переключения (12) и параметров углового движения КА. В областях 1–3 происходит штатное движение КА, в областях 4 и 5 формируются управляющие моменты, направленные на уменьшение угловой скорости КА, если она по каким-либо причинам станет больше допустимой. Управляющие моменты в выделенных областях должны формироваться в соответствии с выражениями:

- 1 – $M = M_m$ при $f > 0$ и $\dot{\vartheta} < \dot{\vartheta}_m - \varepsilon_f$,
- 2 – $M = 0$ при $f > 0$ и $|\dot{\vartheta} - \dot{\vartheta}_m| \leq \varepsilon_f$,
- 3 – $M = -M_m$ при $f < 0$ и $\dot{\vartheta} < -\dot{\vartheta}_m - \varepsilon_f$,
- 4 – $M = -M_m$ при $f > 0$ и $\dot{\vartheta} > \dot{\vartheta}_m + \varepsilon_f$,
- 5 – $M = M_m$ при $f < 0$ и $\dot{\vartheta} > -\dot{\vartheta}_m - \varepsilon_f$.

Пример 2.

Рассмотрим разворот КА с параметрами примера 1, если расстояние до цели по поверхности Земли составляет 120 км.

Найденное по упрощенной формуле начальное приближение для длительности переходного процесса $t_k = 8,68$ с. Используем это приближение для итерационного алгоритма и определяем, что $\dot{\vartheta}_1$ составляет $2,904$ °/с, что превышает максимально допустимое значение, поэтому требуется трехэтапный разворот. В результате работы итерационного алгоритма определяем:

$$t_{01} = 3,548 \text{ с}, t_{12} = 2,044 \text{ с}, t_{23} = 3,509 \text{ с}, t_k = 9,098 \text{ с}, \vartheta_{\text{цк}} = 10,122^\circ, \dot{\vartheta}_{\text{цк}} = -1,351^\circ/\text{с}.$$

Процессы на фазовой плоскости показаны на рис. 6.

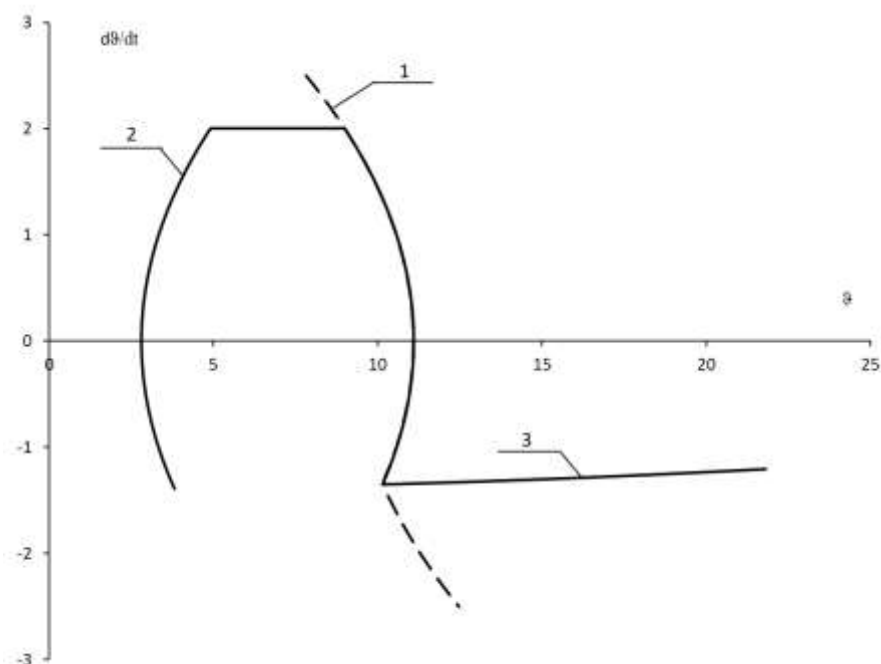


Рис. 6. Трехэтапный разворот:

- 1 – линия переключения;
- 2 – фазовая траектория разворота КА;
- 3 – фазовая траектория движения цели

При условии совпадения расчетных и фактических параметров КА, а также отсутствии возмущающих воздействий, управление по разомкнутой или замкнутой схемам обеспечит один и тот же процесс разворота КА. Управление по замкнутой схеме принципиально необходимо и дает лучшие результаты, если вышеприведенные условия не выполняются.

ОПТИМАЛЬНЫЙ РАЗВОРОТ ПРИ ОТКЛОНЕНИИ ФАКТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КА ДЗЗ ОТ РАСЧЕТНЫХ ЗНАЧЕНИЙ

На рис. 7 показан процесс двухэтапного разворота КА с параметрами из примера 1 для случая управления по замкнутой схеме, если фактическая тяга двигателей меньше расчетной на 10%, что приводит к уменьшению углового ускорения ε_0 . Тот же эффект возникает и при увеличении момента инерции КА. Предполагается, что линия переключения формировалась в нулевой момент времени для расчетных параметров.

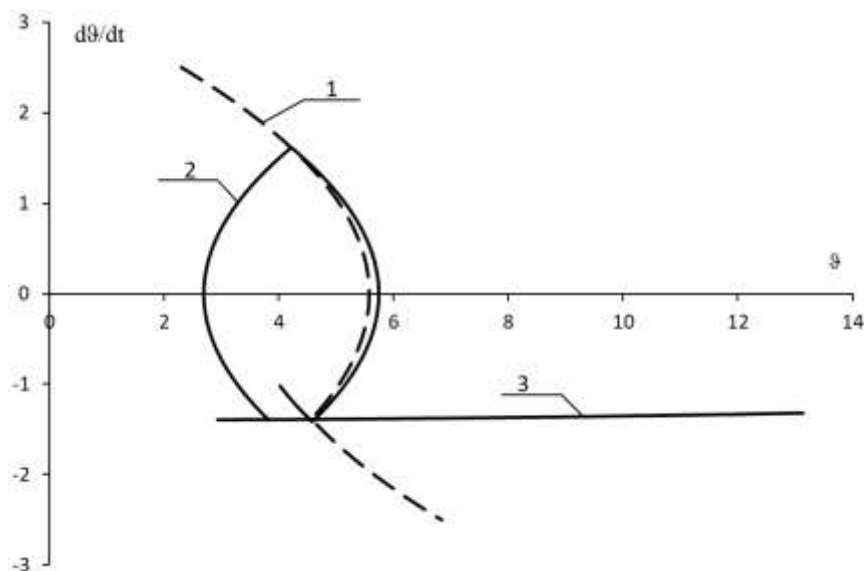


Рис. 7. Разворот при уменьшенной тяге двигателей:
1 – линия переключения; 2 – фазовая траектория разворота КА;
3 – фазовая траектория движения цели

Моделирование показало, что время этапа разгона составило 3,49 с, больше расчетного на 0,333 с, время этапа торможения – 3,53 с, больше расчетного на 0,376 с, после второго переключения снова включился этап разгона. Видно, что при дальнейшем продолжении работы в системе установится длительный колебательный процесс, весьма далекий от расчетного значения. На рис. 8 показаны фазовые траектории в заключительной стадии разворота.

Расчеты показали, что минимальное отклонение от расчетной конечной точки достигается за время 7,06 с, с отклонением по углу $0,04^\circ$, а по угловой скорости – $0,12^\circ/\text{с}$. Отклонение линии визирования от направления на цель по углу составляет $1,22^\circ$, а по угловой скорости – $0,08^\circ/\text{с}$. В процессе разворота минимальное отклонение линии визирования от направления на цель по углу составляет $0,876^\circ$, а по угловой скорости – $0,496^\circ/\text{с}$. Угловые параметры в конечной точке недопустимо большие.

На рис. 9 показан процесс двухэтапного разворота КА с параметрами из примера 1 для случая управления по замкнутой схеме, если фактическая тяга двигателей больше расчетной на 10%, что приводит к увеличению углового ускорения.

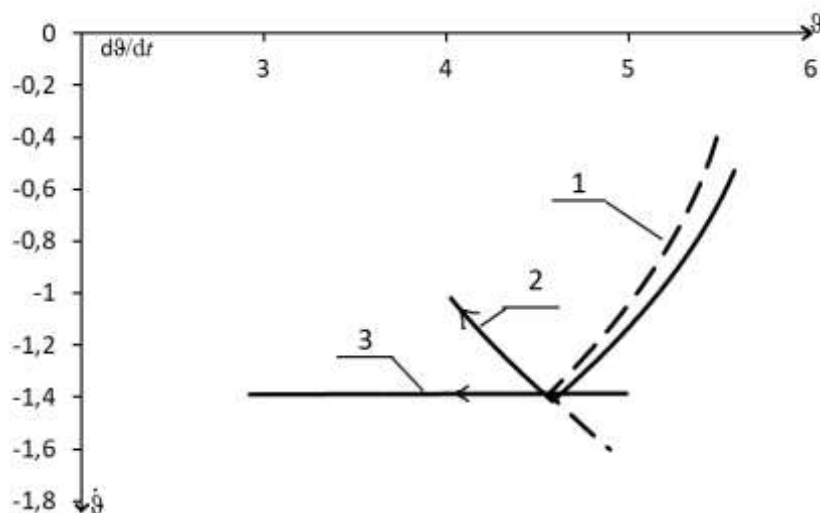


Рис. 8. Фазовые траектории в заключительной стадии:
 1 – линия переключения; 2 – фазовая траектория разворота КА;
 3 – фазовая траектория движения цели

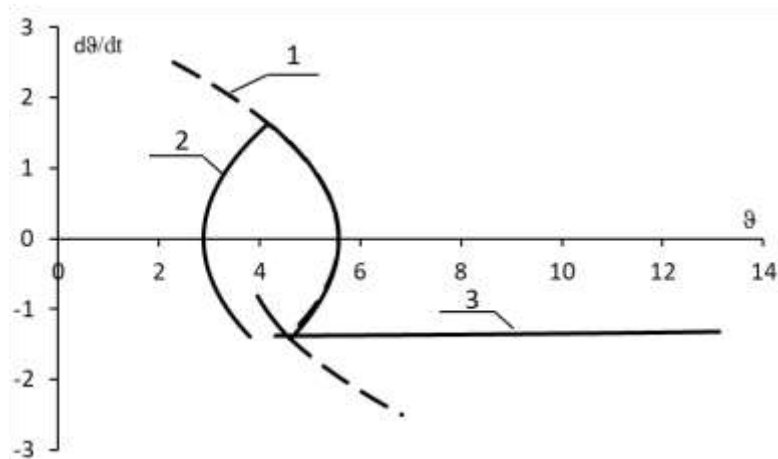


Рис. 9. Разворот при увеличенной тяге двигателей:
 1 – линия переключения; 2 – фазовая траектория разворота КА;
 3 – фазовая траектория движения цели

Время этапа разгона составило 2,93 с, меньше расчетного на 0,227 с, время этапа торможения – 2,97 с, меньше расчетного на 0,184с, после второго переключения снова включился этап разгона. Видно, что при дальнейшем продолжении работы системы, как и в предыдущем случае, установится длительный колебательный процесс. На этапе торможения возникает скользящий режим (рис. 10), благодаря которому фазовая траектория движения КА практически совпадает с линией переключения, поэтому в заключительной стадии минимальное отклонение от расчетной конечной точки достигается за время 5,94 с, практически без отклонений по углу и угловой скорости. Отклонение линии визирования от направления на цель по углу составляет $0,494^\circ$, а по угловой скорости – $0,01^\circ/\text{с}$. В процессе разворота минимальное отклонение линии визирования от направления на цель по углу составляет $0,349^\circ$, а по угловой скорости – $0,576^\circ/\text{с}$.

При изменении фактических параметров КА от расчетных значений меняется длительность разворота КА. Поскольку цель является подвижной, ее угловые параметры в момент

окончания разворота вследствие влияния возмущающих факторов отличаются от расчетных значений, полученных в нулевой момент времени, что и приводит к существенным отклонениям. Более того, при уменьшении углового ускорения вместо рассчитанного в нулевой момент времени трехэтапного разворота может потребоваться двухэтапный разворот, а при увеличении углового ускорения вместо двухэтапного разворота может потребоваться трехэтапный разворот. Как показало моделирование, отклонения в этих случаях становятся еще больше.

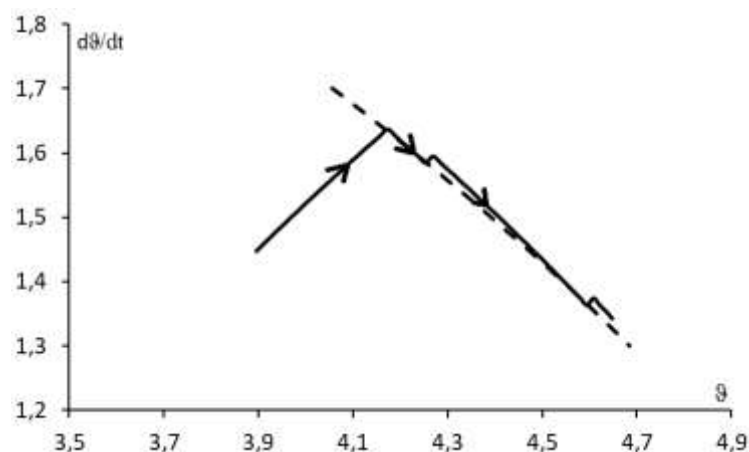


Рис. 10. Скользящий режим

Для уменьшения отклонений в конечной точке целесообразно периодически с помощью итерационного алгоритма производить пересчет с целью уточнения координат конечной точки, типа разворота и при необходимости корректировать линию переключения.

Моделирование при уменьшенном фактическом угловом ускорении показало, что периодический перерасчет оказывает незначительное влияние на величину отклонений по углу и угловой скорости, поскольку на этапе торможения изменение линии переключения никак не влияет на процесс разворота. Так, для разворота с параметрами примера 1, уменьшенном на 10% угловом ускорении при пересчете линии переключения с периодом 1 с уменьшение ошибок параметров углового движения составило не более 5%. Уменьшение периода пересчета к снижению ошибок не привело.

При увеличенном фактическом угловом ускорении периодический перерасчет линии переключения приводит к существенному уменьшению отклонения линии визирования от направления на цель. Результаты моделирования для КА с параметрами примера 1 и увеличенном на 10% угловом ускорении приведены в табл. 1.

Таблица 1

Моделирование для КА с параметрами примера 1

Период перерасчета, с	Отклонение по углу, °	Отклонение по угл. скорости, °/с
Без перерасчета	0,506	0,029
1	0,346	0,024
0,5	0,229	0,019
0,1	0,005	0,017

Эффект уменьшения отклонений достигается за счет скользящего режима, который возникает на этапе торможения, вследствие чего фазовая траектория углового движения КА практически совпадает с периодически корректируемой линией переключения. На рис. 11 изображен заключительный участок разворота КА. Цифрами 1, 2 и 3 показаны линии переключения при $t = 0$ с, $t = 3$ с и $t = 6$ соответственно, цифрой 4 обозначена фазовая траектория КА с явно выраженными признаками скользящего режима, цифрой 5 – фазовая траектория движения цели.

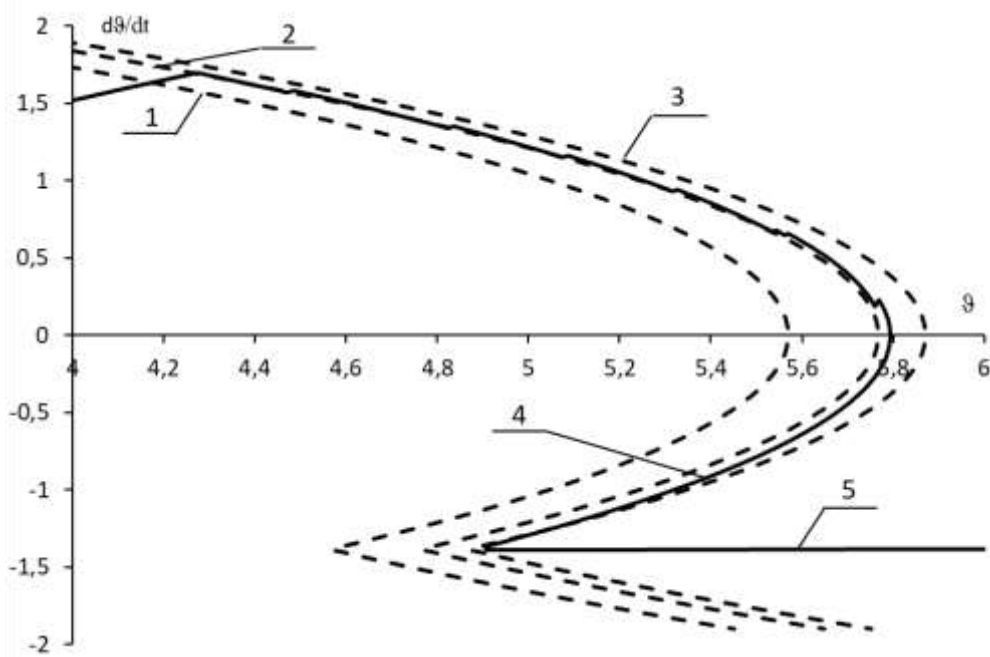


Рис. 11. Заключительный участок разворота

Предложенный алгоритм хорошо обеспечивает заданную точность наведения, если фактическое угловое ускорение равно или больше расчетного значения, и недостаточно хорошо в противном случае, поэтому расчетное значение углового ускорения при проектировании системы необходимо выбирать меньше возможного фактического значения.

В данной работе основное внимание было уделено вопросам двухэтапного разворота. Полученные результаты нетрудно распространить на трехэтапный разворот, а также рассмотренные в работе [2] развороты вдогонку.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный алгоритм позволяет решить задачу оптимального по быстродействию управления разворотом КА ДЗЗ с неизвестными в нулевой момент времени угловыми параметрами конечной точки. Управление по замкнутой схеме позволяет обеспечить заданную точность по углу и угловой скорости при отклонении фактических параметров КА ДЗЗ от расчетных значений.

Расчетные значения рекомендуется выбирать таким образом, чтобы фактическое угловое ускорение было больше расчетного, тогда на этапе торможения система работает в скользящем режиме, за счет которого фазовая траектория движения КА ДЗЗ совпадает с линией переключения и с высокой точностью достигает конечной точки.

Список используемых источников

1. *Власов В. А., Горбулин В. И., Зозуля Л. П.* Расчет оптимального по быстродействию перенацеливания оптико-электронной аппаратуры космического аппарата дистанционного зондирования Земли // *Информация и космос.* – 2009. – № 1. – С. 71–81.
2. *Крыжановский В. И., Горбулин В. И., Трофимов И. А.* Алгоритм оптимального по быстродействию перенацеливания космического аппарата при наблюдении объектов различного типа // *Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского.* – 2019. – Вып. 668. – С. 237–249.
3. *Крыжановский В. И., Трофимов И. А., Слатов С. В.* Алгоритм оптимального по быстродействию пространственного разворота космического аппарата дистанционного зондирования Земли // *Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского.* – 2021. – Вып. 676. – С. 228–238.
4. *Карпов А. Г.* Теория автоматического управления: учеб. пособие. – Томск: ТМЛ-Пресс, 2011. – 212 с.
5. *Алексеев К. Б., Бебенин Г. Г., Ярошевский В. А.* Маневрирование космических аппаратов. – М.: МГТУ имени Н. Э. Баумана, 1970. – 559 с.

А. Ю. Николаев*;

Е. Б. Самойлов**,

кандидат технических наук;

В. В. Шмелёв**,

доктор технических наук, доцент

*1-й ГИК МО РФ, Архангельская обл., г. Мирный.

**Военно-космическая академия

имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург.

МОДЕЛЬ ВЫЯВЛЕНИЯ СЕМАНТИЧЕСКИХ ОШИБОК В АЛГОРИТМАХ ПЕРВИЧНОЙ ОБРАБОТКИ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

В статье приведено краткое описание этапов обработки телеметрической информации космических средств, для них приведены описания семантических ошибок алгоритмов обработки. Рассмотрены и проанализированы формальные системы, используемые для описания алгоритмов, обоснован выбор МП-автоматной модели.

Поставлена задача выявления ошибок алгоритмов обработки телеметрической информации, для которой синтезирована модель выявления ошибок алгоритмизации, основанная на применении автоматного-лингвистического подхода.

Для алгоритмов контроля канальной и кадровой синхронизации, а также отбраковки недостоверных кадров приведены практические примеры работы предложенных моделей, основанные на использовании тестовых сегментов группового телеметрического сигнала, показана правильность выявления ошибок.

Ключевые слова: обработка телеметрической информации, автоматная модель, лингвистическая модель, ошибки обработки.

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на высокий уровень развития современных информационных технологий, обработка телеметрической информации космических средств остается сложным многоэтапным процессом, где циркулируют разнородные и разнотипные информационные потоки. При этом на всех этапах осталась значительная доля человеческого фактора, т. е. человек-оператор принимает решение не только о техническом состоянии бортовых систем (что является конечной целью обработки), но и осуществляет подготовку и выбор исходных данных обработки, производит выбор требуемых каналов (телеметрируемых параметров) и выполняет многие другие операции. Поэтому в процессе обработки возникают ошибки, связанные с невнимательностью и недостаточной квалификацией оператора.

Помимо этого, процесс обработки телеметрической информации может проходить некорректно вследствие несовершенства алгоритмов обработки и ошибок, связанных с реализацией соответствующего специального программного обеспечения (СПО) обработки. Несмотря на его верификацию, проведение автономных и комплексных испытаний, такие ошибки часто встречаются при испытаниях СПО обработки [1–4]. Поэтому конечная цель первичной обработки телеметрической информации космических средств – получение необходимого количества достоверных оценок телеметрируемых параметров с привязкой их ко времени – может быть не достигнута.

Таким образом, разработка и использование механизма выявления (с последующей сатисфакцией) различных ошибок на этапах жизненного цикла СПО комплексов первичной обработки телеметрической информации космических средств является актуальной задачей. В данной статье предложен один из путей ее решения.

ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ОБРАБОТКИ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

В настоящее время космические войска Воздушно-космических сил эксплуатируют следующие три основных вида космических средств: ракеты-носители, разгонные блоки и космические аппараты. Особенности конструкции, целевого назначения, эксплуатации указанных групп КСр предполагают применение различных схем (и соответствующих им операций) обработки их телеметрической информации. Вместе с тем, теория и практика обработки показала, что для подавляющего числа КСр все операции можно объединить в три этапа, включив в каждый из них схожие для всех КСр технологические операции. Рассмотрим их более подробно.

Предварительная обработка.

Исходными данными для предварительной обработки является групповой телеметрический сигнал (ГТС) КСр, представляющий собой закодированные по определенным алгоритмам измерения датчиков бортовой радиотелеметрической системы в цифровом виде. При совершении предварительной обработки выполняются следующие операции:

- выбор необходимых параметров, интервалов времени для обработки и оценки качества измерений. Осуществляется в соответствии с заданием на обработку, учитывающим интересы потребителя результатов обработки и возможность решения последующих задач;
- предварительное повышение достоверности входной информации путем выявления и отбраковки недостоверных телеметрических кадров (ТМК);
- декоммутиация группового телеметрического сигнала, куда входит синхронизация наземной и бортовой части телеметрической системы и выделение из ГТС информации по отдельным каналам сигнала (т. е. измерения отдельных телеметрируемых параметров).

Первичная обработка.

Основной целью первичной обработки является корректный перевод относительных величин (единиц телеметрической шкалы) в абсолютные единицы отсчета (физические единицы). На вход поступают декоммутированные измерения ТМП (по отдельным каналам). Здесь выполняются следующие технологические операции:

- повышение достоверности телеметрических данных (путем отбраковки аномальных измерений, сглаживания, усреднения измеренных параметров и учета состояния каналов измерения и передачи данных);
- дешифровка выбранных данных, т. е. определение оценок измеряемых параметров в физических единицах (выполняется калибрование и тарирование телеметрических данных);
- привязка дешифрованных значений ТМП ко времени.

Вторичная обработка.

Так называется процесс определения технического состояния бортовых систем. Вторичная обработка включает в себя:

- представление и анализ результатов обработки;
- определение параметров состояния и оценку работоспособности БС;
- определение обобщенных характеристик БС и КСр в целом;
- выработку элементов решения на управление КСр.

Комплекс алгоритмов и программ, используемых при вторичной обработке ТМИ, очень разнообразен и имеет крайне сложную структуру, поэтому в рамках данной статьи ошибки СПО, использующегося при анализе ТС БС, рассматриваться не будут. Следует отметить, что помимо вышеприведенной классификации, для каждой из категорий КСр выделяется оперативная, экспресс- и полная обработка телеметрической информации. Здесь этапы обработки и соответствующие им операции рассмотрены без учета специфики этих видов.

ОШИБКИ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Обычно под алгоритмом обработки [1] (применительно к телеметрической информации) понимается совокупность операций обработки с описанием их определенных характеристик. Алгоритмы обработки соответствуют операциям и их характеристикам: декоммутация с номерами каналов и значениями маркеров, масштабирование с коэффициентами и т. д.

Определим семантическую ошибку при выполнении алгоритма обработки телеметрической информации как неправильное указание характеристик соответствующей операции, приводящее к значительному расхождению результата ее выполнения с ожидаемым (или не получение результата совсем).

Для алгоритмов, реализующих рассмотренные выше операции первичной обработки, выделим следующие основные ошибки:

- неверный выбор каналов или разрядов для извлечения ТМИ из ГТС при декоммутации;
- неправильное указание номеров каналов с маркером при отбраковке недостоверных кадров, приводящее к пропуску недостоверных телеметрических кадров (или наоборот, отбраковке неискаженной информации);
- неправильный выбор временного интервала для синхронизации бортовой и наземной частей РТС, что приводит к ложной синхронизации и полной потере непригодности ТМИ к использованию;
- неправильный выбор допусков для алгоритмов повышения достоверности отдельных ТМП, что также приводит к пропуску недостоверных и отбраковке неискаженных измерений;
- использование несоответствующих измерительному преобразователю тарировочных характеристик (ТХ) (или использование некорректных ТХ);
- неверное указание номеров каналов при калибровании телеметрических измерений (если оно необходимо);
- выбор неверного значения временного сдвига при привязке телеметрических измерений ко времени.

Эти ошибки, в зависимости от конкретной ситуации, могут привести как к искажению отдельных результатов обработки измерений, так и к полной потере всех результатов обработки.

Ниже более подробно рассмотрено выявление ошибок алгоритмов, реализующих кадровую и каналную синхронизацию при декоммутации ГТС, а также алгоритма отбраковки недостоверных телеметрических кадров.

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ФОРМАЛЬНОГО АППАРАТА ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ МОДЕЛИ ВЫЯВЛЕНИЯ ОШИБОК

На сегодняшний день для описания вычислительных процессов обработки телеметрической информации; используется большое число формальных систем [5, 6]. Наиболее известными и проработанными до прикладного применения являются:

- рекурсивные функции;
- автоматные модели;
- лингвистические модели (формальные грамматики);
- логические исчисления;
- ассоциативные исчисления;
- представляемые функции.

Указанные системы в том или ином виде позволяют описать класс вычислимых функций и эквивалентны в смысле описываемых процессов. Результаты сравнения описательной или моделирующей мощности этих систем приведены в табл. 1. Взаимное расположение ячеек в

таблице дает представление об описательной мощности систем: чем выше ячейка в таблице, тем выше у нее описательная мощность, при этом находящиеся выше системы включают в себя все нижние, а расположенные в таблице на одной горизонтали – приблизительно эквивалентны.

Таблица 1

Сравнение описательной мощности формальных систем

Рекурсивные функции	Автоматы	Грамматики	Логические исчисления	Ассоциативные исчисления	Представляемые функции
Частично рекурсивные функции	Машина Тьюринга	Грамматики без ограничений (типа 0)	Исчисление предикатов 1-го порядка	Системы Поста, нормальные алгоритмы Маркова	Вычислимые функции
Общерекурсивные функции		Линейно-ограниченные автоматы			НС-грамматики (контекстно-связанные грамматики, грамматики типа 1)
Примитивно-рекурсивные функции	Автоматы с магазинной памятью				КС-грамматики (бесконтекстные грамматики, грамматики типа 2)
	Конечные автоматы (детерминированные и недетерминированные)	Автоматные грамматики (регулярные грамматики, грамматики типа 3)			Исчисление высказываний
Конечные непериодические процессы					

Для решения задачи контроля процесса обработки информации выбор формального аппарата, в рамках которого осуществляется дальнейший синтез моделей обработки и выявление ошибок, имеет существенное значение.

На сегодняшний день проведен сравнительный анализ разрешимости (т. е. существования универсального алгоритма) для каждого из рассмотренных выше классов формальных систем применительно к задачам анализа технического состояния бортовых систем [4, 6]. Экстраполяция этих результатов на моделирование процесса обработки телеметрической информации и возможность последующего анализа возникновения ошибок привела к результатам, представленным в табл. 2, где рассмотрены только автоматные и лингвистические модели, поскольку они наилучшим образом подходят для описания процессов автоматизированной обработки ТМИ [6].

Таким образом, наиболее подходящим инструментом для моделирования процесса выявления ошибок при обработке телеметрической информации являются автоматы с магазинной памятью, конечные автоматы и соответствующие им КС- и регулярные грамматики.

В связи с многостадийностью и сложностью процесса обработки ТМИ целесообразно разбить общую задачу проведения контроля правильности алгоритма выполнения задач обработки на ряд взаимосвязанных задач.

Основными здесь являются пять целевых подзадач:

- 1) формирование терминального алфавита информационного языка;
- 2) преобразование операций обработки (результатов операций обработки) в исходные данные для работы алгоритмов;
- 3) формирование информационных структур (предложений), представляющих взаимные связи между операциями (этапами) обработки ТМИ;
- 4) построение математических моделей автоматов и грамматик в соответствии с общей структурой процесса обработки;
- 5) выявление ошибок процесса обработки ТМИ по поступившим ее результатам.

Таблица 2

Результаты анализа возможности применения автоматнo-лингвистических моделей для решения задач моделирования процесса обработки ТМИ и выявления ошибок алгоритмов обработки

Формальные системы		Разрешимость задач (описательная мощность)	
Автоматы	Грамматика	Синтез моделей	Выявление ошибок обработки
Машина Тьюринга	Грамматика без ограничений	–	–
Линейно-ограниченные автоматы	НС-грамматика	–	–
Автоматы с магазинной памятью	КС-грамматика	+	+
Конечные автоматы	Регулярные грамматика	+	+

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим процесс обработки телеметрической информации O как следующее упорядоченное множество:

$$O = \langle G, A, Y, T, X \rangle, \quad (1)$$

- где G – групповой телеметрический сигнал, содержащий данные N каналов (телеметрируемых параметров);
- A – набор алгоритмов обработки, $A = (A_1, A_2, \dots, A_M)$;
- T – временные интервалы обработки для каждого ТМП, $T = (T_1, T_2, \dots, T_N)$;
- Y – результаты обработки телеметрической информации после выполнения каждого алгоритма (операции) обработки, $Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_M)$. Здесь $Y_i = V_i \times T_i$, где V_i – массив значения i -го ТМП;
- X – «ожидаемые» результаты обработки ТМИ, $X = (X_1, X_2, \dots, X_M)$.

При этом выполняются следующие отображения:

$$(G \times A_1) \rightarrow Y_1, \quad (2)$$

$$(Y_i \times A_{i+1}) \rightarrow Y_{i+2}, \quad i = \overline{1, M-1}. \quad (3)$$

Ошибки обработки при выполнении i -й операции не произойдут в том случае, если будет выполнено следующее условие:

$$X_i \approx Y_i. \quad (4)$$

Необходимо разработать набор моделей контроля $K = (K_1, K_2, \dots, K_M)$ правильности выполнения операций обработки для осуществления сравнения (4), т. е.

$$(Y_i \times K_i) \rightarrow X_i.$$

Далее рассмотрим предложенные автоматные модели при выполнении операций декоммутации, дешифровки и калибровки.

ФОРМИРОВАНИЕ МОДЕЛИ ВЫЯВЛЕНИЯ ОШИБОК ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ЭТАПОВ ОБРАБОТКИ

Канальная синхронизация при декоммутации ГТС.

Одной из наиболее распространенных ошибок, возникающей при выполнении алгоритмов декоммутации A_1 , является ложная канальная синхронизация, т. е. появление в одном из счетчиков синхроимпульсов необходимого количества требуемых символов, несмотря на неправильно выбранный порядок декоммутации ГТС. Это может быть обусловлено двумя причинами: искажениями ГТС или появлением требуемой последовательности случайно, вследствие равенства вероятности появления нуля и единицы на каждой позиции ГТС. Определим (для примера) размер слова в 9 разрядов, восемь – информационные, девятый – синхроразряд, формируемый по алгоритму «проверка на 1». Для обеспечения вероятности ошибки ложной синхронизации $P_{\text{лс}} = 10^{-6}$ количество анализируемых слов для синхронизации $m = 24$ [2, 3].

Разработанный МП-автомат P_1 осуществляет запись в магазин значения синхроразряда. Работа автомата P_1 начинается после появления синхроимпульса канальной синхронизации, входная цепочка символов ГТС G представляет собой непрерывный цифровой поток (последовательность нулей и единиц). Работа автомата оканчивается после появления в девятом разряде нуля, т. е. при сбое.

Рассмотрим автомат с магазинной памятью [5] (МП-автомат), реализующий операцию контроля правильности выполнения алгоритма декоммутации K_1 :

$$P_1 = (Q_1, \Sigma_1, \Gamma_1, \delta_1, q_0, Z_0, F), \quad (5)$$

где Q_1 – множество состояний МП-автомата P_1 , $Q_1 = \{q_1 - q_{17}\}$;

Σ_1 – множество входных символов, $\Sigma_1 = \{0, 1\}$;

Γ_1 – магазинный алфавит, для канальной синхронизации, $\Gamma_1 = \{1\}$;

δ_1 – функция переходов (описана ниже);

Z_0 – маркер дна магазина;

F – множество конечных состояний, для разрабатываемого автомата F состоит из одного элемента.

Логика работы P_1 заключается в следующем: автомат становится в состояние q_0 после поступления в систему обработки канального синхроимпульса. Далее в магазин записывается каждый девятый входной символ, т. е. синхросимволы. Автомат завершает работу, если

осуществляется попытка записать в магазин нулевой символ. Таким образом, опишем функцию перехода δ_1 в виде диаграммы переходов так, как показано на рис. 1.

Указанный автомат P_1 реализован в системе JFLAP Version 8.0 (Beta) [7]. В случае возникновения ошибки канальной синхронизации (рассинхронизации), автомат переходит в состояние F , при этом количество символов в магазине соответствует номеру слова, в котором произошла ошибка.

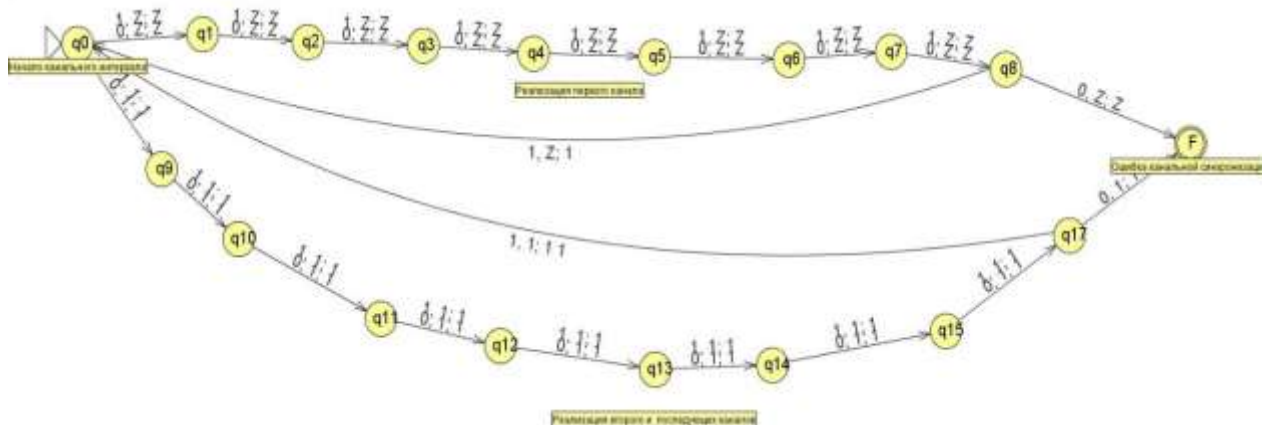


Рис. 1. Реализация МП-автомата выявления ошибок канальной синхронизации ГТС

В качестве примера рассмотрим тестовый сигнал G_1 , представляющий собой входную цепочку символов 101110001 101010101 101010100, где ошибка синхронизации – в третьем слове. Подадим цепочку в P_1 , автомат перейдет в состояние F , в магазине окажется комбинация «111». На рис. 2 представлена динамика переходов P_1 , с указанием состояния стека для каждого состояния.

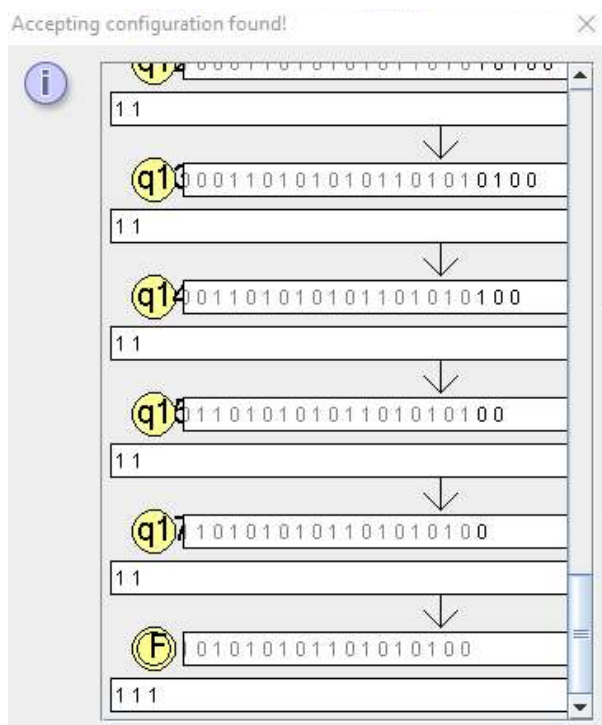


Рис. 2. Выявление ошибки канальной синхронизации в третьем слове ГТС

В случае правильной последовательности тестового сигнала X_1 (101110001 101010101 101010101) P_1 в состояние F , очевидно, не переходит, возвращается в состояние q_0 .

Кадровая синхронизация при декоммутации ГТС.

В качестве исходных данных рассмотрим телеметрическую систему, кадр которой состоит из четырех слов (первое – маркер кадра «01111111», остальные – информационные), структура слов такая же, как описана выше для операции «канальная синхронизация при декоммутации ГТС».

На этапе предварительной обработки ТМИ корректность выполнения алгоритмов кадровой синхронизации осуществляется путем сравнения полученного маркера кадра с его номинальным значением, совпадение указывает на правильность выполнения алгоритмов синхронизации.

Автомат P_2 , выявляющий ошибки кадровой синхронизации и реализующий модель контроля K_2 , представим в следующем виде:

$$P_2 = (Q_2, \Sigma_2, \Gamma_2, \delta_2, q_0, Z_0, F), \tag{6}$$

- где Q_2 – множество состояний МП-автомата P_2 ;
- Σ_2 – множество входных символов, $\Sigma_2 = \{0, 1\}$;
- Γ_2 – магазинный алфавит, для кадровой синхронизации, $\Gamma_2 = \{1, 2\}$;
- δ_2 – функция переходов (описана на рис. 3);
- Z_0 – маркер дна магазина;
- F – множество конечных состояний, для разрабатываемого автомата F состоит из одного элемента.

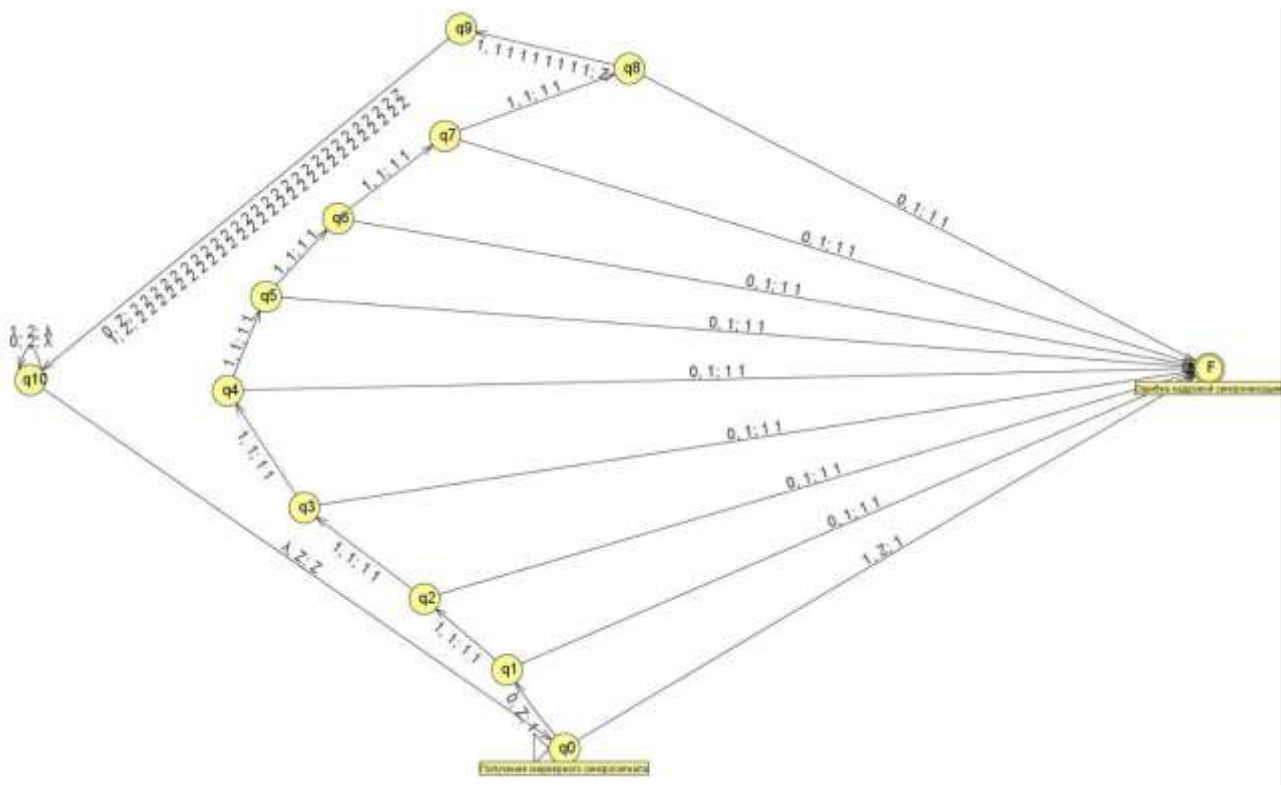


Рис. 3. Реализация МП-автомата выявления ошибок кадровой синхронизации ГТС

Указанный автомат (рис. 3) работает следующим образом: стартовое состояние устанавливается q_0 после поступления в систему обработки маркерного синхроимпульса. Далее P_2 «пропускает» маркерный канал. Если его символы соответствуют комбинации «01111111», то информация следующих трех каналов – 27 символов – «проходит» через автомат, не переводя его в конечное состояние F , после чего устанавливается инициальное состояние q_0 . В случае несоответствия маркера указанной комбинации, автомат переводится в состояние F , в магазине оказывается количество единиц, соответствующее номеру ошибочного разряда маркерного слова.

В качестве примера работы P_2 рассмотрим тестовую входную цепочку символов Y_1 : 01111111 101110001 101010101 101010100 011111110, где ошибка кадровой синхронизации – в 9-м разряде 5-го слова (маркерного). Подадим цепочку в P_2 , автомат перейдет в состояние F , в магазине окажется комбинация «11111111» (рис. 4).

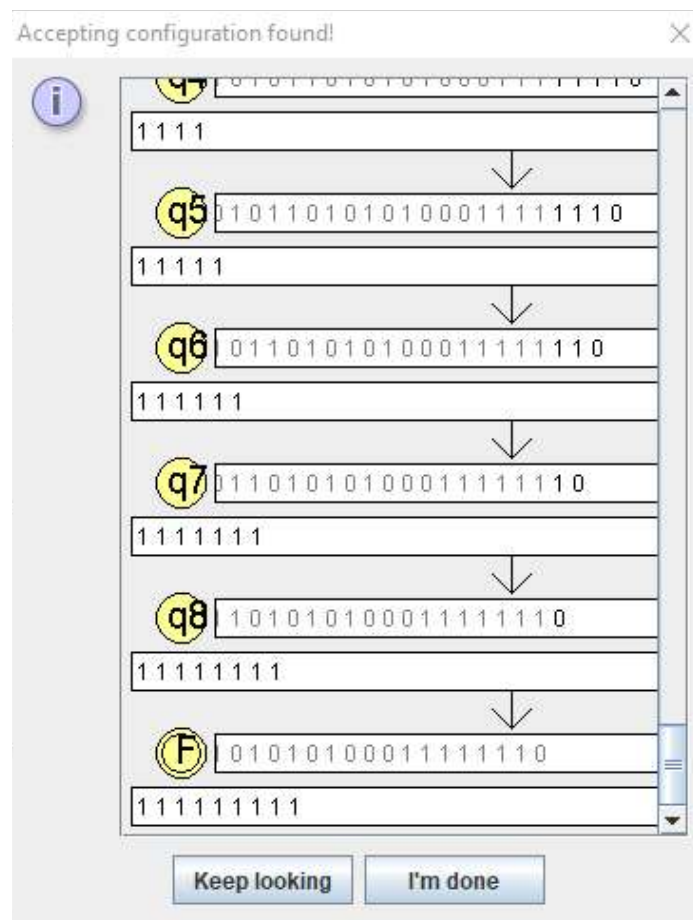


Рис. 4. Выявление ошибки кадровой синхронизации в 9-м разряде 2-го кадра ГТС

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенные в статье автоматные модели позволяют выявлять ошибки, возникающие при реализации алгоритмов обработки ТМИ КСр, путем сравнения на i -м этапе обработки ожидаемых X_i и полученных Y_i ее результатов.

Новизной предложенных алгоритмов является их построение на основе МП-автоматных моделей. Их преимуществом являются достаточно высокая универсальность применительно

к телеметрическим структурам, гибкость (так как они эквивалентны контекстно-свободным языкам), простота программной реализации.

При проведении дальнейших исследований необходимо синтезировать и реализовать операции контроля правильности следующих алгоритмов:

- отбраковки недостоверных ТМК;
- допускового контроля;
- выбора ТХ;
- калибрования измерений;
- привязки ко времени.

Затем предполагается проведение их верификации и экспериментальных исследований для реальных телеметрических измерений.

Разработанный аппарат может получить прикладное применение в программных средствах обработки ТМИ перспективных КСр, оснащаемых БРТС с высокой информативностью.

Список используемых источников

1. Шмелёв В. В., Ткаченко В. В. Систематизация требований к разработке перспективных аппаратно-программных комплексов обработки телеметрической информации ракетно-космической техники // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2015. – Вып. 646. – С. 38–46.

2. Шмелёв В. В., Самойлов Е. Б. Модели операций технологического процесса и контроля правильности из выполнения // Техника средств связи. – 2013. – № 4. – С. 54–60.

3. Шмелёв В. В., Копкин Е. В., Самойлов Е. Б. Порядок формирования требований к качеству обработки измерительной информации ракетно-космической техники // Вооружение и экономика. – 2018. – № 2 (44). – С. 23–28.

4. Теория и практика построения автоматизированных систем мониторинга технического состояния космических средств: монография / О. В. Майданович [и др.]. – СПб.: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2011. – 219 с.

5. Хопкрофт Дж., Мотвани Р., Ульман Дж. Введение в теорию автоматов, языков и вычислений: пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2002. – 528 с.

6. Мальцев В. Б. Анализ состояния технических систем. – МО РФ, 1992. – 182 с.

7. JFLAP home page : сайт. – URL: <https://www.jflap.org/> (дата обращения: 10.12.2021).

А. И. Алтухов,
кандидат технических наук, доцент

ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ ДИДАКТИЧЕСКИХ И ЭРГОНОМИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТОВ ЭЛЕКТРОННОГО УЧЕБНИКА ПО ФИЗИКЕ

В статье рассмотрены электронные учебные издания как совокупность взаимосвязанных дидактических средств посредством технологии мультимедиа. Представлены дидактические и эргономические возможности электронных учебных изданий на примере электронного учебника по физике. Приведены примеры использования дидактических средств для поддержки основного (текстового) материала учебника.

Ключевые слова: электронные учебные издания, электронный учебник, дидактические средства, мультимедиа технологии.

ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие информационно-коммуникационных технологий требует создавать новые подходы к формированию и использованию дидактических средств с целью повышения качества образовательной деятельности [1–5]. Одними из основных дидактических средств являются учебники и учебные пособия, составляющие основу библиотек образовательных организаций. Согласно Федеральному закону «Об образовании в Российской Федерации» № 273-ФЗ от 29 декабря 2012 г. (с изменениями 2020 г.) [6], образовательные организации обязаны иметь электронные библиотеки, основой которых являются электронные учебные издания.

В настоящей статье рассматриваются вопросы, связанные с разработкой дидактических и эргономических компонентов электронных учебных изданий на примере электронного учебника по физике.

ЭЛЕКТРОННЫЕ УЧЕБНЫЕ ИЗДАНИЯ И МУЛЬТИМЕДИЙНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

На первом этапе выполнение требований статьи 18 Федерального закона «Об образовании в Российской Федерации» по формированию электронных библиотек заключалось в основном в переводе печатных учебных изданий в их цифровые копии. Это не противоречило требованиям ГОСТов по электронным учебным изданиям [7–9]. Действительно, согласно [8] электронный учебник – это текстовый документ на цифровом носителе, который имеет определенную структуру с возможностью контекстного поиска. Такой цифровой документ можно рассматривать как аналог печатной книги. Например, текст учебника, представленный в формате *.pdf с элементами навигации по тексту, согласно [8], удовлетворяет требованиям электронного учебника. С другой стороны, если сравнить учебник, представленный в формате *.pdf, с традиционным аналогичным печатным изданием, то существенных отличий как в содержательной части, так и в форме ее представления мы не увидим. Основное отличие этих двух видов учебных изданий заключается в носителе информации. В первом случае, это цифра. Носителем информации в традиционном печатном учебнике является бумага. И не факт, что с учебником в формате *.pdf удобней работать.

С развитием мультимедийных технологий расширялись и совершенствовались функциональные возможности электронных учебных изданий [10], конкретизировались требования к структуре и форме представления в них учебного материала [11, 12]. Сегодня электронные

учебные издания представляют многофункциональную систему, в которой элементы информации различной природы дополняют друг друга при помощи специального программного обеспечения [9]. Ключевым здесь является то, что информация в электронном учебном издании представлена совокупностью взаимосвязанных элементов различной природы: текст, видео, звук, анимации, статическая и динамическая графика, таблицы и т. п. По-другому, современное электронное учебное издание посредством информационных и мультимедиа технологий гармонично объединяет в себе в единый комплекс целый ряд дидактических средств. Это позволяет реализовать такие принципы обучения, как системность, наглядность, доступность учебного материала, направленных на формирование глубоких и прочных знаний обучающегося.

Следует отметить, что электронные учебные издания не являются заменой традиционных (печатных) учебных изданий, которые на протяжении длительного времени остаются основой познания. Все возможности традиционных учебных изданий в электронных сохраняются. Отличие электронных учебных изданий от традиционных состоит в реализации таких возможностей представления содержательной части информации, возможностей работы с информацией, которые **не могут быть** реализованы в печатных учебных изданиях. Приведем некоторые из таких возможностей. Во-первых, это реализация различных элементов навигации для управления контентом электронного учебника, во-вторых, сопровождение текста учебного материала видеороликами и анимациями, статической и динамической графикой и т. п. по теме изучаемого материала. В-третьих, оперативный доступ к справочной информации. В-четвертых, самоконтроль и восполнение (при необходимости) знаний и др. Реализация таких возможностей направлена на то, чтобы сделать образовательный процесс, включая самостоятельную работу обучающихся, более доступным, понятным и интересным. Покажем это на примере электронного учебника «Физика» [13].

ДИДАКТИЧЕСКИЕ И ЭРГОНОМИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЭЛЕКТРОННОГО УЧЕБНИКА ПО ФИЗИКЕ

Функциональная структура электронного учебника соответствует его назначению в образовательной деятельности и содержит все необходимые компоненты. Эргономические возможности обеспечены, во-первых, представлением учебного материала, разделенного на разделы и параграфы в строгом логическом порядке, во-вторых, учетом межпредметных связей изучаемого материала, его связи с практикой, в-третьих, возможностью самоконтроля усвоения учебного материала и, наконец, комфортной работой с учебником, которая выражается в удобном и понятном интерфейсе пользователя, доступными формами и способами изложения учебного материала, использованием оптимальных шрифтов и цветовой гаммы и др. [12].

Базовым компонентом электронного учебника является **основной материал**, под которым понимается текстовая часть содержания этого учебника, включающая в себя все элементы печатного учебника: текст, статическая графика, формулы, таблицы, справочные данные и т. п. Структура и содержание текстовой части учебника определяются примерной программой по дисциплине «Физика», рекомендованной научно-методическим советом по физике и соответствуют базовому уровню изучения этого курса в политехнических вузах. Фрагмент представления основного материала в электронном учебнике приведен на рис. 1.

Дополнительный материал направлен на реализацию двух функций. С одной стороны, такой материал способствует более доступному изложению основного учебного материала, с другой – направлен на его расширение и углубление по сравнению с требованиями ФГОС и рабочей программой учебной дисциплины. Дополнительный материал включает в себя справочную информацию, статическую и динамическую графику, сопровождающую основной учебный материал, видеоролики, демонстрирующие проявления изучаемых физических яв-

лений, анимированные гипотетические модели процессов микромира, недоступные для непосредственного наблюдения, имитацию рисования преподавателем графических объектов на классной доске с поэтапным пояснением и другие компоненты мультимедийного контента электронного учебника. Дополнительный материал связан с основным материалом **системой навигации** посредством гиперссылок и пиктограмм, которые обеспечивают быстрый поиск информации, переход к нужному фрагменту учебника.



Рис. 1. Фрагмент представления основного материала в электронном учебнике

Информация справочного характера содержит сведения по физике, математике (определения физических и математических понятий, значения постоянных и т. п.). Кроме того, к справочной информации относятся биографии известных физиков, сведения из истории открытий физических явлений и другая информация по изучаемой теме, направленная на расширение кругозора обучающегося. На рис. 2 приведен пример результата обращения к справочной информации.

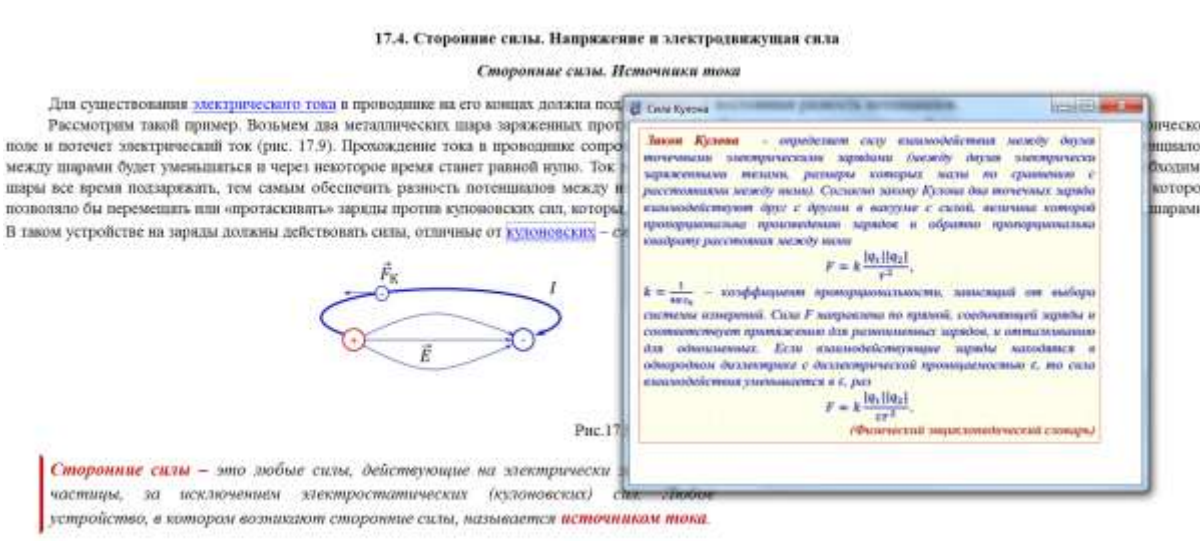


Рис. 2. Представление справочной информации в учебнике

Статическая графика представлена набором иллюстраций (рисунки, фотографии, графики и др.) по изучаемой теме. Система навигации посредством гиперссылок обеспечивает оперативный переход к связанной картинке (иллюстрации). Тем самым реализуется один из основных принципов обучения – наглядность. Для примера на рис. 3 показано, как словесное и математическое описание закона смещения Вина, сопровождается посредством гиперссылки иллюстрацией, которая наглядно демонстрирует проявление этого закона.



Рис. 3. Иллюстрация закона смещения Вина

На рис. 4 показан пример графической иллюстрации математической формулировки условия интерференционного максимума.



Рис. 4. Графическая иллюстрация математической формулировки условия интерференционного максимума

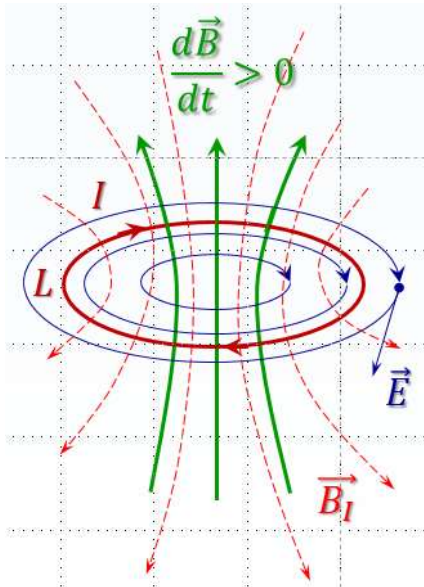


Рис. 5. Графическое изображение связи электрического и магнитного полей

процесс. Такая форма представления графических объектов довольно сложна для восприятия. Компьютерная анимация существенно расширяет эргономические возможности изложения подобного учебного материала. Графический объект, приведенный на рис. 5, отображается на экране последовательно по мере описания рассматриваемого явления природы с соответствующими комментариями. Фрагменты такой анимации приведены на рис. 6.

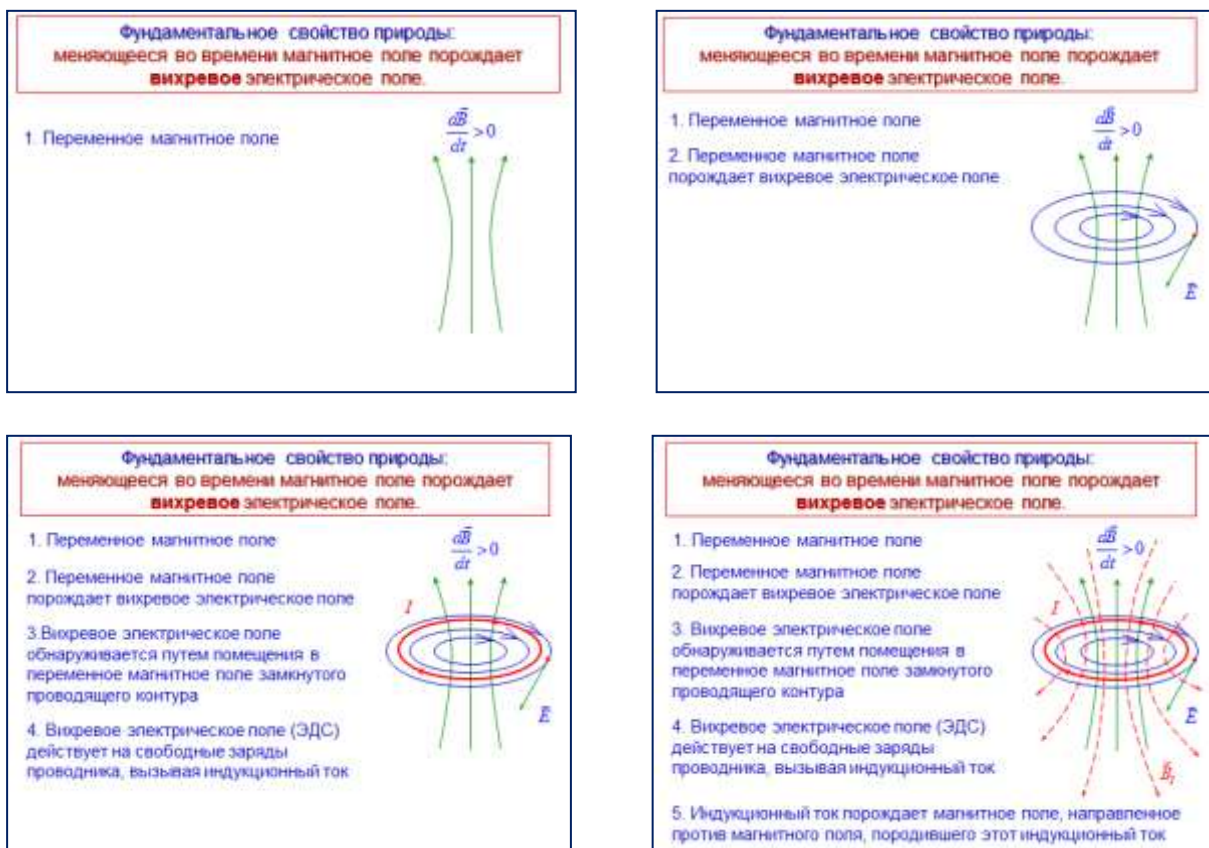


Рис. 6. Фрагменты анимации поэтапного представления основного свойства природы

Динамическая графика. Возможности электронного учебника позволяют «оживить» статическую графику. Для этого формируется база данных видеофайлов с анимациями поэтапного построения сложных, насыщенных информацией графических объектов. Каждый этап рисования сопровождается текстовым пояснением. Другими словами, в электронном учебнике появляется возможность имитации процесса отображения преподавателем графических объектов на классной доске во время лекции. Доступность в понимании этой части учебного материала достигается путем подачи информации о рассматриваемом физическом явлении фрагментами, которые легче усваиваются обучающимся [14].

Покажем это на примере. На рис. 5 представлена графическая иллюстрация одного из основных свойств природы, демонстрирующая генерацию вихревого электрического поля переменным магнитным полем. Именно в таком виде в печатном учебнике представлен соответствующий электромагнитный процесс.

Благодаря мультимедийным технологиям электронный учебник позволяет включить в свой состав такое дидактическое средство, как видеоролики по рассматриваемой теме. Это могут быть видеосюжеты с показом физических опытов, механизмов и устройств, работа которых основана на изучаемых законах физики, видеосюжеты с демонстрацией проявления физических явлений в природе и др. Ниже приведен фрагмент видеоролика, демонстрирующего проявление силы Лоренца (рис. 7) после описания действия этой силы в тексте учебника.

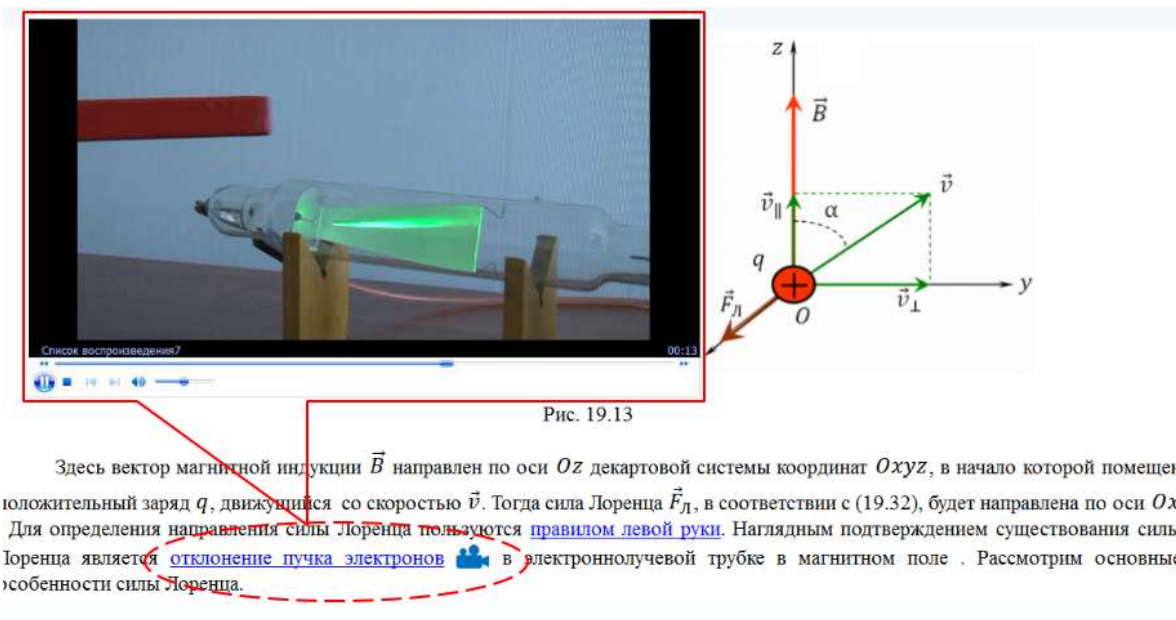


Рис. 7. Демонстрация проявления силы Лоренца

Особенность таких видеосюжетов в том, что они демонстрируют результат проявления физического явления. В данном случае это отклонение пучка электронов под действием магнитного поля (рис. 7). Другие видеоролики демонстрируют отклонение стрелки амперметра (опыты М. Фарадея), стрелки компаса (опыты Г. Эрстеда), перемещение проводника под действием силы Ампера и т. д. В тоже время видеоролик, демонстрирующий, например, проявление силы Лоренца не показывает причину, которая вынуждает поток электронов отклоняться под действием магнитного поля, видеоролик, демонстрирующий отклонение стрелки амперметра в опытах М. Фарадея не показывает причину, которая вынуждает стрелку амперметра отклоняться от нулевого положения и др. Современные технологии позволили «оживить» гипотетические модели микромира, недоступные непосредственному наблюдению, наглядно продемонстрировать причины, вызывающие те или иные природные явления (рис. 8).

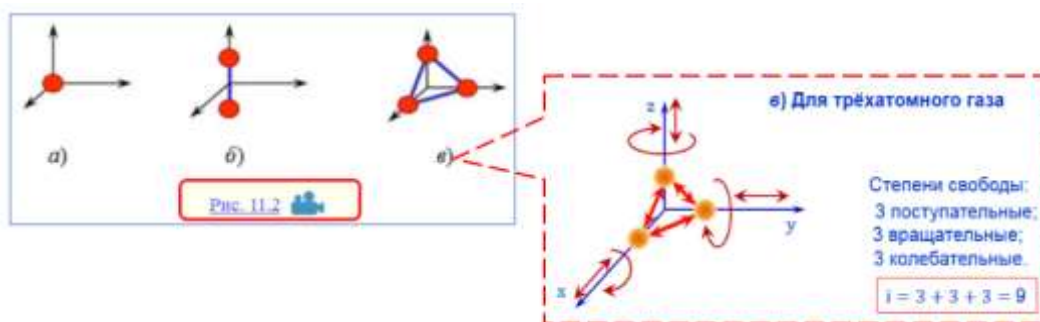


Рис. 8. Фрагменты анимации процессов микромира, демонстрирующие степени свободы различных молекул

Важное достоинство дидактических и эргономических возможностей электронного учебника – это представление учебного материала в форме видеоряда, начиная с определения и описания физического механизма рассматриваемого явления, демонстрации гипотетических моделей микромира изучаемых физических явлений, их математического описания и заканчивая показом их практического применения (рис. 9), указанием роли и места при изучении дисциплин профессионального цикла. Такое представление информации способствует формированию интереса у обучающихся к изучаемому предмету, пониманию его места в общей системе подготовки по специальности.

1. Определение физического явления

Закон сохранения импульса: при отсутствии внешних сил импульс механической системы остается неизменным.

2. Физический механизм явления

Уравнение движения материальной точки (тела) переменной массой
(уравнение Мещерского)

Закон сохранения импульса замкнутой системы позволяет объяснить принцип реактивного движения. Рассмотрим его на примере движения ракеты. В процессе сгорания топлива, вследствие чего образовавшиеся газы вырываются из сопла двигателя с большой скоростью. В отсутствие внешних сил полный импульс ракеты и вылетающих газов остается неизменным. Как следствие, скорость движения ракеты изменяется.

Запишем для рассматриваемой системы «ракета – газы» закон сохранения импульса. Пусть в некоторый момент времени t импульс ракеты равен $m\vec{v}$. Обозначим выделившиеся от ракеты и движущиеся со скоростью \vec{v}_r за малый промежуток времени dt . Тогда для момента времени $t + dt$ будет справедливо равенство

$$(m - dm)(\vec{v} + d\vec{v}) + dm\vec{v}_r = m\vec{v}.$$

Раскроем скобки и получим равенство $m\vec{v} - dm\vec{v} + md\vec{v} - dmd\vec{v} + dm\vec{v}_r - m\vec{v} = 0$. Произведение $dmd\vec{v}$ пренебрегаем как малым высшего порядка относительно ракеты, обозначив ее через $\vec{v}_{отн}$. С учетом этого получим следующие формулы:

3. Прикладной аспект

Будем считать $\vec{v}_{отн} = \text{const}$ и разделим обе части последнего



Рис. 9. Фрагменты иллюстрации практического применения закона сохранения импульса

Модуль самоконтроля полученных знаний. Учебник (электронный учебник) является основным дидактическим средством самостоятельной работы обучающихся. Возможность самоконтроля знаний является важным достоинством электронного учебника. Такой контроль предполагает три этапа. На первом этапе обучающемуся предлагается письменно ответить на контрольные вопросы, приведенные в конце каждой темы учебного материала. На втором этапе – решить задачи различной сложности. При этом для всех задач приведены ответы, а некоторые задачи в качестве методической помощи даются с детальным разбором, решением и правилами оформления. На третьем этапе обучающемуся предлагается пройти тест по изучаемой теме (рис. 10). Если по результатам теста получена оценка ниже отличной, то обучающийся может повторить материал, где у него есть пробелы в знаниях, и пройти тест снова.

Таким образом, можно сделать вывод, что электронный учебник, с одной стороны, сохраняет все возможности печатных учебников, с другой, обладает принципиально новыми качествами, включающими дидактические средства, которые обеспечивают высокий уровень

наглядности и доступности учебного материала, возможность самостоятельного контроля усвоения полученных знаний, которые расширяют кругозор обучающегося. Другими словами, электронный учебник – это дидактическое средство с расширенными возможностями по сравнению с печатным учебником.

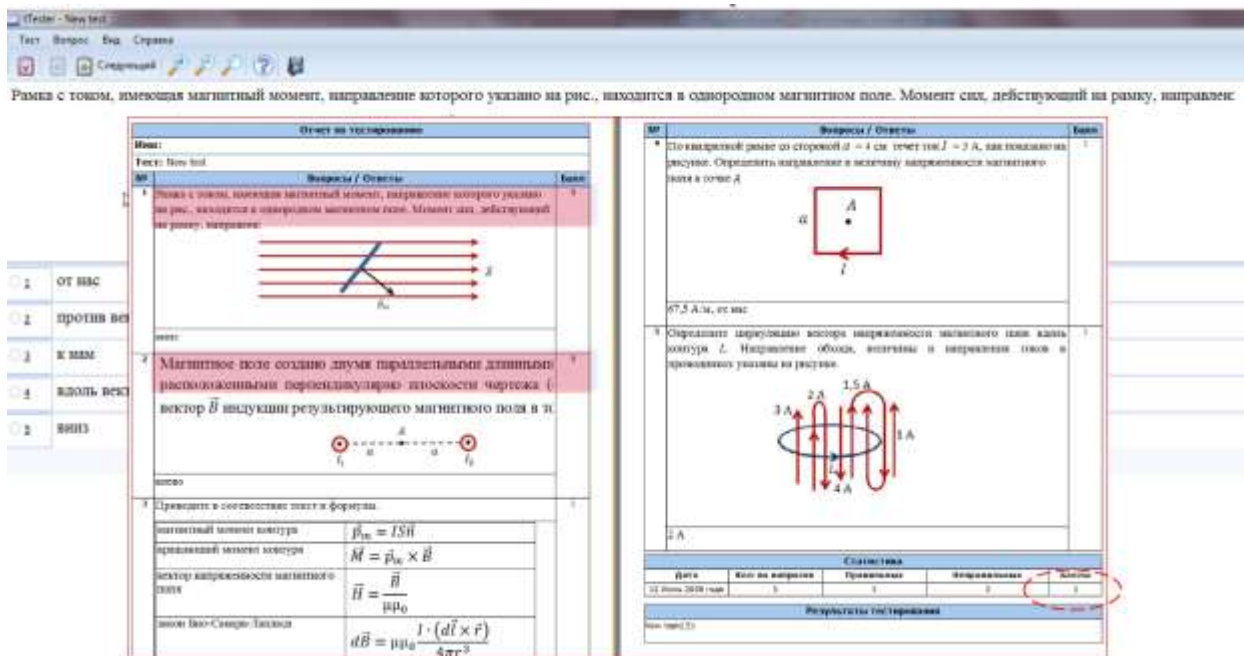


Рис. 10. Фрагмент работы модуля «Проверь себя»

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Все перечисленные дидактические компоненты электронного учебника разрабатываются и реализуются с использованием технологии мультимедиа на современных ПЭВМ, электронных планшетах в соответствующих операционных средах. Это позволяет объединить ряд дидактических средств в единую систему в рамках электронного учебника и, тем самым, существенно расширить возможности дидактических средств в педагогике. В статье показаны такие возможности на примере реализации технологии мультимедиа в электронном учебнике по физике, показано, как можно объединить целый комплекс дидактических средств в единое целое с учетом выполнения требований к эргономике электронного учебника. Однако следует отметить, что для использования технологии мультимедиа в образовательной деятельности от преподавателя требуется не только свободное владение учебным материалом, но и необходимый уровень подготовки в области современных информационно-коммуникационных технологий.

Список используемых источников

1. Способ интерактивного обучения: пат. RUS 2664946 / Кулешов Ю. В., Алтухов А. И., Сквасников М. А., Шабиков Е. И., Чебурков М. А. – № 2015142302; заявл. 05.10.2015; опубл. 23.08.2018. – ID: 37379089.
2. Алтухов А. И., Головина В. В., Калинин В. Н. Формирование и критерии оценивания общекультурных и профессиональных компетенций в цикле математических и естественно-

научных дисциплин // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2014. – Вып. 642. – С. 210–215.

3. Васильева Н. В., Кунтурова Н. Б., Прокофьева А. Л. Образовательные средства информационно-коммуникационных технологий в учебном процессе военного вуза // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 661. – С. 207–214.

4. Васильева Н. В., Кунтурова Н. Б., Малыгина Е. А. Применение электронной информационной образовательной среды при обучении в вузах // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. – 2019. – № 2. – С. 149–158.

5. Булекбаев Д. А., Морозов А. В. Формирование и развитие навыков вычислительного эксперимента у обучающихся на примере исследования динамической системы // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2017. – Вып. 659. – С. 202–209.

6. Об образовании в Российской Федерации: федеральный закон № 273-ФЗ от 29 декабря 2012 г. [с изменениями 2020 г.]. – М.: Юридическое издательство, 2020. – 160 с.

7. ГОСТ Р 7.0.60–2020. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Издания. Основные виды. Термины и определения: национальный стандарт Российской Федерации – М.: Стандартинформ, 2020. – 42 с.

8. ГОСТ Р 57724–2017. Информационно-коммуникационные технологии в образовании. Электронный учебник. Общие: национальный стандарт Российской Федерации. – М.: Стандартинформ, 2017. – 12 с.

9. ГОСТ Р 7.0.83–2013. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Электронные издания. Основные виды и выходные сведения: национальный стандарт Российской Федерации. – М.: Стандартинформ, 2014. – 19 с.

10. Электронные учебники: рекомендации по разработке, внедрению и использованию интерактивных мультимедийных электронных учебников нового поколения для общего образования на базе современных мобильных электронных устройств. – М.: Федеральный институт развития образования, 2012. – 84 с.

11. Единый стандарт электронного учебника [утв. Министром обороны Российской Федерации 29 сент. 2015 г.]. – М.: ОАО «12 центральная типография», 2015.

12. Методические рекомендации по созданию интерактивных электронных учебников и обучающих курсов для подготовки военных специалистов по основным и дополнительным профессиональным образовательным программам. – М.: ОАО «12 центральная типография», 2016.

13. Физика [Электронный ресурс]: базовый электронный учебник для вузов МО РФ / В. Н. Калинин [и др.]. – Электрон. текстовые дан. (800 Мб). – ВКА имени А. Ф. Можайского, 2018. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

14. Алтухов А. И., Калинин В. Н. Мультимедийное сопровождение лекций как важнейшая дидактическая составляющая физического образования в военном вузе // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 668. – С. 322–328.

В. Л. Гузенко,
кандидат технических наук, профессор;
В. Л. Дорохов,
доктор военных наук, доцент;
Н. В. Курдай,
кандидат военных наук, доцент

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОНЦЕПЦИИ «ПРИЕМЛЕМОГО РИСКА» ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ УЧЕБНО-МАТЕРИАЛЬНОЙ БАЗЫ БОЕВОЙ ПОДГОТОВКИ В ПОВСЕДНЕВНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ВОЙСК

В публикации предложен подход к оцениванию рисков объектов боевой подготовки, базирующийся на анализе состояний объектов. На объекты воздействует множество факторов различной природы, проявление которых приводит к возникновению рисков при принятии решений. Учет рисков должностными лицами позволяет получить достоверные количественные оценки риска реализации управленческих решений.

Ключевые слова: учебно-материальная база, безопасность, боевая подготовка, риск, ущерб.

ВВЕДЕНИЕ

В совокупности взаимосвязанных элементов боевой подготовки важную роль играет учебно-материальная база, состоящая из объектов. Каждый объект характеризуется целым рядом свойств. Практическая ценность анализа свойства «безопасность» применительно к объектам боевой подготовки состоит в поиске ответов на следующие вопросы: удовлетворит ли данное свойство субъектов боевой подготовки? и как его улучшить? Как известно, в общем случае оценить безопасность объекта можно только тогда, когда известны требования к количественным значениям показателей данного свойства. Обоснование таких требований – задача достаточно сложная, но необходимая.

В настоящее время известны два принципа обеспечения безопасности эксплуатации потенциально опасных объектов. Принцип «абсолютной безопасности», который за рубежом носит название ALARA (*as low as practically achievable*) и «принцип приемлемого риска» – принцип ALARA (*as low as reasonably*). Последний был сформулирован после катастрофы на Чернобыльской АЭС. Основными его положениями явились:

- обеспечение «абсолютной безопасности» объективно невозможно;
- уровень «приемлемого риска» может быть оценен количественно;
- обеспечение безопасности состоит в снижении риска до приемлемого уровня.

Таким образом, основное положение принципа (концепции) «приемлемого риска» может быть практически реализовано только при известном уровне такого риска.

СЕМАСИОЛОГИЧЕСКИЙ¹ ВЗГЛЯД НА РИСК ПРИ ОЦЕНКЕ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ

На наш взгляд, весьма целесообразно, прежде чем перейти непосредственно к изложению сущности предлагаемого подхода, необходимо пояснить значение понятия риска в рассматриваемом аспекте. Под риском эксплуатации объектов будем понимать возможность невыполнения в полном объеме требований руководящих документов личным составом из-за

¹ Семасиология – наука о значениях слов и словосочетаний.

неопределенностей случайного характера, объективно существующих в повседневной деятельности войск. Поэтому должностные лица, обладая соответствующей оценкой риска, могут заранее спланировать необходимые меры по уменьшению негативных последствий тех или иных проявлений риска. Своевременная и правильная реализация данных мер способствует снижению уровня рисков до допустимых значений.

Анализ факторов, влияющих на безопасность в повседневной жизни войск, позволяет сделать следующие выводы:

- для определения допустимых значений вероятностей возникновения происшествий, объектами которых являются военнослужащие, уровень «приемлемого риска» целесообразно назначить как для практически невозможных событий, что в мировой практике соответствует величине вероятности 10^{-4} – 10^{-3} ;

- для определения допустимых значений вероятностей возникновения происшествий, объектами которых являются здания, сооружения и т. п., следует использовать подход, основанный на построении модели процесса их эксплуатации в виде графа состояний.

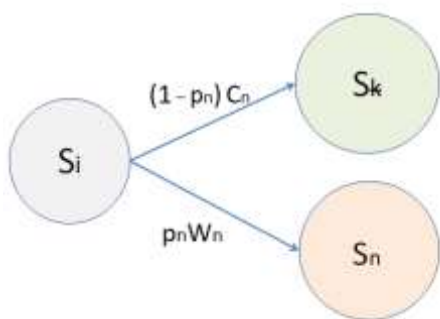


Рис. 1. Граф состояний объекта

Рассмотрим данный подход подробнее.

Эксплуатация объекта боевой подготовки имеет своей конечной целью (состояние S_k) получение какого-то полезного эффекта C_n . Вместе с тем, при эксплуатации объекта всегда существует риск возникновения происшествия (нанесения ущерба объектам безопасности – состояние S_n), оцениваемого возможностью нанесения ущерба и его размером $p_n W_n$. Данные рассуждения могут быть представлены в виде графа состояний объекта, изображенного на рис. 1.

Следуя основным положениям концепции «приемлемого риска» представляется возможным утверждать, что безопасность эксплуатации объекта может считаться допустимой в том случае, если потенциальный полезный эффект от эксплуатации объекта $(1 - p_n)C_n$ будет больше риска возникновения происшествия $p_n W_n$, т. е. выполняется следующее неравенство (критерий «приемлемого риска»):

$$(1 - p_n)C_n \geq p_n W_n. \quad (1)$$

Неравенство (1) отражает только технико-экономический аспект обеспечения безопасности эксплуатации объекта и не учитывает социального аспекта. Для устранения этого недостатка необходимо ввести в рассмотрение коэффициент приемлемости риска $k_{пр}$, представляющий собой приемлемое для армии и общества в целом отношение риска возникновения происшествия к возможному полезному эффекту эксплуатации объекта.

Преобразование неравенства (1) с учетом коэффициента $k_{пр}$ позволяет получить максимально допустимое значение вероятности возникновения происшествия, исходя из возможного ущерба и ожидаемого полезного эффекта от эксплуатации объекта:

$$P_i^{\partial} = \frac{k_{пр} C_n}{k_{пр} C_n + W_{ni}} \quad (2)$$

где W_{ni} – ущерб, возможный при возникновении происшествия i -го типа.

Рассмотрим подробнее коэффициент приемлемости риска $k_{пр}$ и попытаемся оценить его значение. Величина коэффициента $k_{пр}$ определяется многими факторами, основными из которых являются:

- текущий уровень состояния безопасности боевой подготовки;
- близость объекта боевой подготовки к местам проживания личного состава;
- возможные последствия потенциальных происшествий.

Перечисленные факторы показывают, что значение коэффициента приемлемости риска будет определяться объектом боевой подготовки, т. е. величина коэффициента $k_{пр}$ будет одинакова для всех происшествий, возможных в ходе процесса боевой подготовки.

С учетом того, что коэффициент $k_{пр}$ представляет собой отношение допустимого риска возникновения происшествия к ожидаемому полезному эффекту от применения объекта по назначению, область его возможных значений лежит в интервале от 0 до 1.

Но как определить эту величину в зависимости от рассмотренных выше факторов? Анализ научно-технической литературы, посвященный рассмотрению аналогичных вопросов, позволяет сделать следующий вывод: определить величину коэффициента $k_{пр}$ представляется возможным только экспертными методами. Но смысл данного коэффициента делает весьма затруднительным формирование группы экспертов, способных компетентно оценить его величину. В таких случаях применяются различные подходы, основанные на декомпозиции оцениваемой величины на характеристики (параметры), определяющие ее и понятные экспертам. Например, подход предполагающий разработку лингвистических и соответствующих им числовых шкал применительно к каждому из параметров, определяющих оцениваемую величину. Эксперты оценивают предлагаемые им параметры по лингвистическим шкалам. Затем осуществляется переход от экспертных лингвистических оценок к соответствующим числовым оценкам параметров. Пример таких шкал представлен в табл. 1.

Таблица 1

**Лингвистические и числовые оценки факторов,
определяющих потенциальный риск возникновения происшествий**

Фактор	Лингвистические оценки	Числовые оценки потенциального риска - P_i
Близость объектов БП к местам проживания личного состава	Объект удален значительно от жилого городка	0
	Объект удален незначительно от жилого городка	0,3
	Объект находится вне жилого городка	0,6
	Объект находится в жилом городке	0,8
	Объект находится в казарме	1
Возможные последствия потенциальных происшествий	Нет последствий	0
	Незначительные последствия	0,3
	Значительные последствия	0,6
	Многодневные последствия	0,8
Текущий уровень состояния безопасности боевой подготовки	Длительные последствия	1
	Очень высокий	0
	Высокий	0,3
	Средний	0,6
	Низкий	0,8
	Очень низкий	1

Предложение группе экспертов для оценивания показателей – P_1 , P_2 , P_3 по лингвистическим шкалам позволяет рассчитывать на достаточный уровень их компетентности, а, следовательно, на адекватность результатов экспертного опроса.

Очевидно, что полученные в результате экспертного опроса показатели P_1 , P_2 , P_3 должны быть усреднены:

$$\Pi_{i \text{ ср}} = \frac{1}{m} \sum_{n=1}^m \Pi_{in}, \quad (3)$$

где m – количество экспертов;
 i – номер показателя ($i = 1, 2, 3$).

После обработки результатов экспертного опроса определяется обобщенный показатель потенциального риска Π_{Σ} как сумма частных показателей:

$$\Pi_{\Sigma} = \Pi_{1\text{ср}} + \Pi_{2\text{ср}} + \Pi_{3\text{ср}}. \quad (4)$$

Теперь остается установить взаимосвязь коэффициента $k_{\text{пр}}$ и показателя Π_{Σ} . Очевидно, что чем больше показатель Π_{Σ} , тем меньше должен быть коэффициент $k_{\text{пр}}$. Кроме того, показатель Π_{Σ} , в отличие от коэффициента $k_{\text{пр}}$, не нормирован и может принимать значения на интервале от 0 до 3. С учетом этих факторов оценка коэффициента приемлемости риска может быть получена с помощью соотношения

$$k_{\text{пр}} = 1 - \frac{\Pi_{\Sigma}}{3}. \quad (5)$$

Далее раскроем состав возможного в результате происшествия ущерба. Из определения ущерба следует, что он включает в себя стоимость поврежденных в результате происшествия материальных ценностей, используемых в ходе процесса боевой подготовки. Однако необходимо учитывать не только непосредственный ущерб, но и ущерб опосредованный. С учетом этого ущерба, возможный в результате происшествия, может быть определен по формуле

$$W_{ni} = W_i^{\text{непоср}} + C_i^{\text{восст}} + W_{\text{пот}i}^{\text{с}} + C_i^{\text{страх}}, \quad (6)$$

где $W_i^{\text{непоср}}$ – непосредственный средний ущерб от происшествия i -го типа (стоимость поврежденного оборудования);
 $W_{\text{пот}i}^{\text{с}}$ – потерянный в результате вынужденного простоя объекта при ремонте полезный эффект;
 $C_i^{\text{восст}}$ – стоимость восстановления объекта после происшествия i -го типа (стоимость восстановительных работ);
 $C_i^{\text{страх}}$ – страховые выплаты после происшествия i -го типа (если они предусмотрены).

Потерянный в результате не использования в процессе боевой подготовки (простоя) объекта полезный эффект может быть определен с помощью соотношения

$$W_{\text{пот}i}^{\text{с}} = K_{\text{ус}}^{\text{пол}} C_{\text{п}} N \quad (7)$$

где $C_{\text{п}}$ – полезный эффект от одного цикла (периода обучения в системе боевой подготовки) использования объекта по назначению;
 N – потенциальное количество циклов применения объекта по назначению за период его восстановления;
 $K_{\text{ус}}^{\text{пол}}$ – коэффициент усиления негативного влияния типа происшествия на морально-психологическое состояние личного состава, и как следствие, размер потерянного полезного эффекта.

Необходимо отметить, что величина коэффициента k может быть определена только методом экспертных оценок. Причем экспертами при этом должны быть лица, имеющие опыт проведения боевой подготовки и принятия высокоответственных решений в этой области.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенное выше позволяет сделать следующие выводы. Показатели безопасности эксплуатации объектов учебно-материальной базы боевой подготовки должны описывать как вероятность наступления неблагоприятных событий, так и возможный ущерб при их наступлении. При этом деятельность должностных лиц по обеспечению безопасности эксплуатации объектов должна базироваться на выработанных практикой принципах, которые можно разделить на организационные и технические, определяющие безопасные условия эксплуатации объектов. И наконец, важно понимать, что абсолютную безопасность обеспечить невозможно. Основопологающей является концепция приемлемого риска и управления риском, которая направлена на обеспечение минимально возможного риска в конкретных условиях проведения мероприятий в ходе боевой подготовки.

Список используемых источников

1. Общевоинские уставы Вооруженных Сил Российской Федерации. – М.: Эксмо, 2018. – 731 с.
2. *Буренок В. М., Буравлев А. И.* Методические основы обоснования количественных параметров Вооруженных Сил по критерию «эффективность–стоимость» // Вооружение и экономика. – 2014. – № 4(29). – С. 73–92.
3. *Волков В. Ф., Толмачев А. А.* Методика учета риска и неопределенности на ранних стадиях жизненного цикла разрабатываемой автоматизированной системы управления // Научные технологии в космических исследованиях Земли. – 2017. – Т. 9, № 3. – С. 63–70.
4. *Елохин А. Н.* Анализ и управление риском: теория и практика. – М.: Полимедиа, 2002. – 192 с.
5. *Тихонов В. И., Хименко В. И.* Проблема пересечений уровней случайными процессами. Радиофизические приложения // Радиотехника и электроника. – 1998. – № 5. – С. 501–523.
6. *Рябинин И. А.* Надежность и безопасность структурно-сложных систем. – СПб.: Политехника, 2000. – 248 с.

А. М. Девяткин,
доктор технических наук, профессор;
Е.С. Раков;
А.Е. Теренин,
кандидат психологических наук

АДАПТАЦИЯ SIR-МОДЕЛЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОРГАНИЗАЦИИ ОБУЧЕНИЯ В ВВУЗЕ В УСЛОВИЯХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НОВОЙ КОРОНАВИРУСНОЙ ИНФЕКЦИИ

В статье описан способ учета в SIR-моделях математической теории распространения эпидемии условий обучения и проживания курсантов ввуза. Приведены результаты расчетов по модифицированной модели. Сформулирована задача по организации обучения в ввузе в условиях распространения коронавирусной инфекции, для решения которой может использоваться разработанная усовершенствованная модель.

Ключевые слова: коронавирус, эпидемия, SIR-модели, математическое моделирование, ввуз, функция Грина, бета-распределение.

ВВЕДЕНИЕ

В начале 2020 г. в мире начал распространяться коронавирус COVID-19. Многие организации и учреждения столкнулись с необходимостью принятия решения об изменении обычного режима функционирования и перехода либо на дистанционный, либо на сокращенный (по времени или по составу работников) режим работы. Поскольку в различных регионах страны эпидемиологическая обстановка существенно отличалась, то решение о переводе организаций на нештатный режим функционирования делегировалось руководству этих организаций. В этих условиях, с одной стороны, свойственные особо опасным инфекционным заболеваниям известные и понятные меры «жесткого карантина» требовали прекращения работы организаций. С другой стороны, в силу экономических и социальных последствий, а также относительно «невысокой» смертности от COVID-19 руководством регионов и ведомств решения о «жестком карантине» не принимались. Таким образом, руководители организаций взвешивали возможные риски для различных вариантов работы организации экспертным (интуитивным) путем.

Формализованных подходов к принятию решения не существовало. Воинские части и учреждения, в том числе и ввузы, также столкнулись с данной проблемой. Особенности ввузов являются большое число обучающихся, преподавателей, их высокая социальная активность, групповое проживание курсантских подразделений, невозможность проведения некоторых занятий (например, практические занятия на ВВСТ) в дистанционном формате, необходимость решения других задач, например, обеспечение участия в Параде Победы.

Поэтому в статье предпринята попытка формализовать постановку задачи принятия руководством ввуза решения о переходе на дистанционное обучение в условиях коронавирусной инфекции, а также адаптировать существующие SIR-модели [1, 6] с учетом факторов, влияющих на распространение эпидемии COVID-19 в военной образовательной организации. Отметим, что при разработке модели внимание уделялось именно способу организации образовательного процесса и влиянию его на распространение коронавируса в ввузе, в то же время хорошо проработанные вопросы санитарно-эпидемиологических и медицинских мероприятий не являются предметом рассмотрения.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ НА ОРГАНИЗАЦИЮ ОБУЧЕНИЯ В ВВУЗЕ В УСЛОВИЯХ ПАНДЕМИИ КОРОНАВИРУСА

Под способом организации образовательного процесса в вузе в условиях пандемии COVID-19 будем понимать перечень и график проведения следующих мероприятий. Во-первых, противоэпидемиологические мероприятия различного уровня, которые предписываются руководящими документами [2]. Во-вторых, режим проведения занятий: дистанционный или смешанный. Пример смешанного режима – теоретические занятия могут проводиться дистанционно, а практические на лабораторной базе в очном формате. В-третьих, условия проживания курсантов: изолированное в составе подразделений в казармах, раздельное (небольшими группами) проживание в городе. В-четвертых, введение расписания проведения занятий с учетом угроз заражения в различные периоды протекания пандемии.

В настоящее время большинство рекомендаций по управлению образовательным процессом лишь на качественном уровне учитывают основные факторы распространения заболевания. Например, в аналитико-имитационной модели поддержки принятия решения о необходимости введения самоизоляции обучающихся на основе современных методов интеллектуальной обработки данных [5] учитывается только характер контактов в курсантском подразделении, коэффициент заражения и коэффициент излечения. В методическом издании [6] перечислены основные подходы к численному моделированию инфекционных заболеваний, однако постановки задачи организации образовательного процесса, а также учета возможностей руководства по управлению образовательным процессом нет. В ряде работ проведен анализ влияния закрытия школ на распространение инфекций [7–11], где авторы демонстрируют, что закрытие образовательных учреждений снижает интенсивность распространения инфекции, однако рекомендаций по снижению заболеваемости и способов их формирования для образовательной организации там нет.

Задача должна быть сформулирована так, чтобы была возможность получать количественные оценки качества организации учебного процесса в условиях пандемии в зависимости от факторов (неуправляемых и управляемых) распространения заболевания среди личного состава. Дадим математическую формулировку организации обучения в вузе в условиях пандемии. Целью организации работы вуза является обеспечение требуемого качества обучения в условиях превышения доли (δ) здорового личного состава над предельно допустимым значением доли (δ^{Tp}) здорового личного состава в заданные временные периоды.

Будем использовать следующие обозначения величин для некоторого рассматриваемого подразделения вуза:

$N(t)$ – функция числа личного состава в подразделении в зависимости от времени t (номер дня);

$S(t)$ – функция числа восприимчивых к заражению в подразделении;

$B(t)$ – функция числа больных в подразделении;

$\delta(t)$ – доля здоровых как функция времени, $\delta(t) = \frac{N(t)-B(t)}{N(t)}$;

$U(t)$ – управляющее воздействие со стороны руководства академии на организацию деятельности вуза:

$$U(t) = \langle V(t), H(t), Q(t), E(t), O(t) \rangle, \quad (1)$$

где $V(t)$ – функция числа вакцинированных в подразделении в заданный день;

$H(t)$ – вектор, характеризующий условия проживания (проживают в городе, в казарме, какова доля);

$Q(t)$ – режим обучения (характеризует очный, дистанционный формат или смешанный режим с описанием расписания занятий);

$E(t)$ – характеристика режима карантина (обуславливается количеством и качеством санитарно-эпидемиологических мероприятий, что влияет на вероятность заражения и скорость выявления латентных больных);

$O(t)$ – управление отпусками.

Отметим, что функция $U(t)$ является векторной функцией дискретного аргумента t (номера дня).

Таким образом, способ деятельности вуза в условиях коронавирусной инфекции определяется заданием множества значений векторной функции $U(t)$ дискретного аргумента t на интервале $[t_H, t_K]$.

Цели управления деятельностью вуза в условиях распространения коронавирусной инфекции могут быть сформулированы следующим образом. Показателем результативности деятельности вуза является доля выполняемых задач в момент времени t :

$$\rho(t) = \frac{n(t)}{M(t)},$$

где $n(t)$ – число выполняемых задач в момент времени t ;

$M(t)$ – число задач, стоящих перед академией в момент t .

Целью организации (планирования) деятельности является обеспечение решения всех стоящих задач, т. е. обеспечение $\rho(t) \rightarrow 1$.

Данные задачи будут решаться, если будет обеспечено превышение доли $\delta(t)$ здорового (имеющегося в распоряжении руководителя) личного состава над требуемым значением $\delta^{TP}(t)$ на весь период выполнения задач:

$$\delta(t) \geq \delta^{TP}(t).$$

На рис.1 представлена идея взаимосвязи $\rho(t)$ и $\delta^{TP}(t)$.

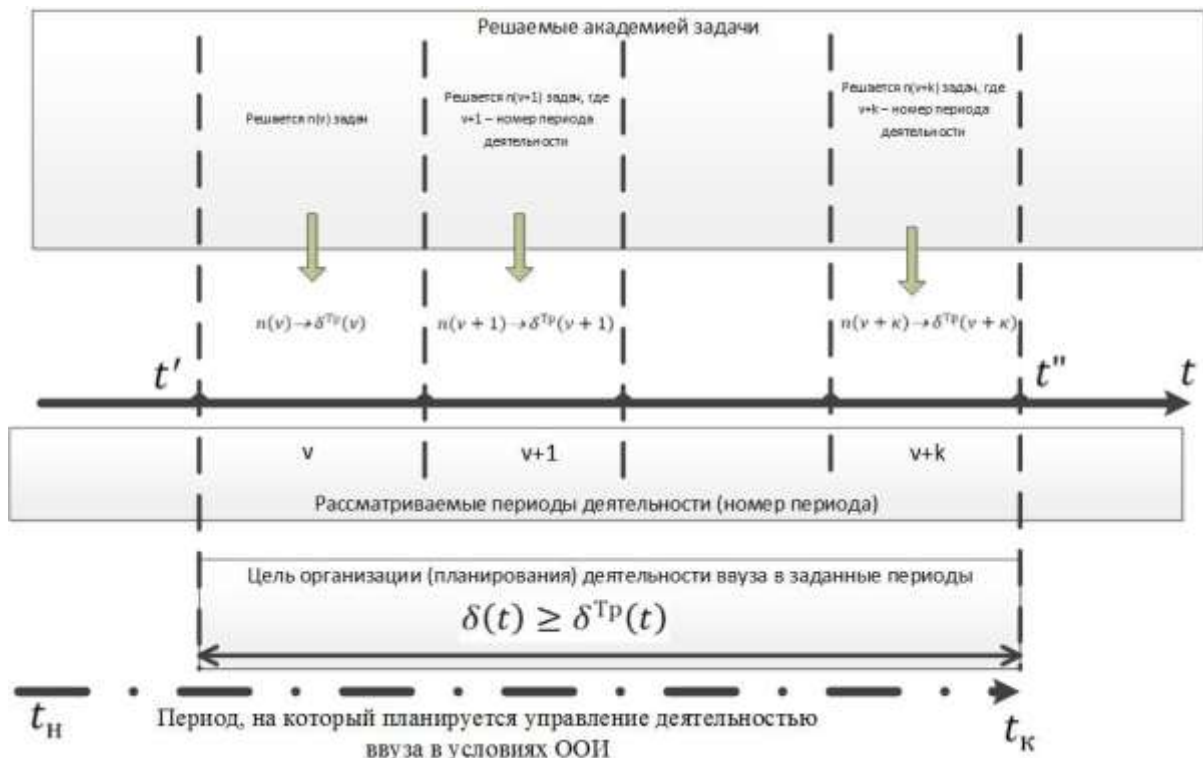


Рис. 1. Схема взаимосвязи обеспечения решаемых задач с долей здорового личного состава и периода управляющих воздействий

На рисунке использованы следующие обозначения: период $[t_n, t_k]$ – отражает продолжительность управляющих воздействий; период $[t', t'']$ – соответствует продолжительности решения задач в условиях ООИ; число $n(v)$ решаемых задач на этапе v обуславливает требуемую численность личного состава, а, следовательно, и долю здорового личного состава: $n(v) \rightarrow \delta^{Tp}(v)$.

Тогда способ деятельности ввуза должен отвечать следующим требованиям:

$$\{U(t)\}, \text{ для } t \in [t_n, t_k] : \delta(t, \{U(t)\}) > \delta^{Tp}(t), \text{ для } t \in [t', t''] . \quad (2)$$

Для определения выполнимости критерия $\delta(t, \{U(t)\}) \geq \delta^{Tp}(t)$ необходимо определить, во-первых, функцию $\delta^{Tp}(t)$, во-вторых, функцию $\delta(t, \{U(t)\})$.

Обобщенный вид функции $\delta^{Tp}(t)$ можно представить следующим образом:

$$\delta^{Tp}(t) = \sum_{v=0}^k [\delta_v \Pi(t; t'_v, t''_v)], \quad (3)$$

где v – номер этапа с различным числом решаемых в вузом задач, число и содержание задач на этапе определяет значение δ_v требуемой доли здоровых людей;

$\Pi(t; t'_v, t''_v)$ – селектор интервала v с границами t'_v, t''_v :

$$\Pi(t; t'_v, t''_v) = \begin{cases} 1, & \text{если } t \in [t'_v, t''_v] \\ 0, & \text{если } t \notin [t'_v, t''_v] \end{cases} . \quad (4)$$

МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ЗАБОЛЕВАЕМОСТИ КУРСАНТОВ С УЧЕТОМ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ КОРОНАВИРУСА В УСЛОВИЯХ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ВВУЗА

Далее опишем модель, обеспечивающую решение с использованием выражения (2) задач выбора способа деятельности ввуза в условиях пандемии коронавируса. Модель представляет собой совокупность выражений, связывающих величины характеристик распространения заболевания в курсантском подразделении со степенью выраженности факторов распространения коронавируса в районе расположения ввуза и способом организации учебного процесса.

Для определения функции $\delta(t, \{U(t)\})$ воспользуемся широко применяемым в эпидемиологии подходом к построению детерминированных SIR-моделей (*Susceptible – Infected – Recovered*), в которых с помощью систем дифференциальных или разностных уравнений описывается динамика групп восприимчивых, инфицированных и выздоровевших индивидов [1]. В данные модели внесем изменения, позволяющие учитывать как объективно существующие неуправляемые факторы $F(t)$ заболеваемости в академии, так и управляющее воздействие $U(t)$ со стороны руководства академии на организацию деятельности ввуза. Неуправляемые факторы $F(t)$ могут быть описаны следующим образом:

$$F(t) = \langle p(t), C(t) \rangle, \quad (5)$$

где $p(t)$ – вероятность заражения коронавирусом при нахождении в городе в течение дня;

$C(t)$ – вектор с характеристиками особенностей протекания заболевания (продолжительность латентного протекания заражения, продолжительность выздоровления, вероятность летального исхода и др.).

Система уравнений для расчета $\delta(t)$ представлена выражениями (6)–(18).

Доля здоровых $\delta(t)$ равна отношению здорового к общему числу личного состава:

$$\delta(t) = \frac{N(t)-B(t)}{N(t)}. \quad (6)$$

Число $B(t)$ болеющих в t -й день равно числу болеющих в предыдущий день плюс прирост $\Delta(t)$ больных (может быть положительный или отрицательный):

$$B(t) = B(t-1) + \Delta(t). \quad (7)$$

Прирост больных обусловлен числом выздоровевших $h(t)$ и числом $z(t)$ заболевших в данный день:

$$\Delta(t) = -h(t) + z(t). \quad (8)$$

Для задания функций $z(t)$ и $h(t)$ воспользуемся аппаратом «функций Грина» («функций влияния»). Так число заболевших $z(t)$ может быть выражено с использованием функции заражения $D(\tau)$ и функции Грина $G(t; \tau)$ следующим образом [3]:

$$z(t) = \int_{-\infty}^{\infty} D(\tau) \cdot G_1(t; \tau) d\tau. \quad (9)$$

В качестве функции Грина $G(t; \tau)$ будем использовать функцию плотности бета-распределения [3] $G_1(t; \tau) = \varphi_{\tau}^B(t - \tau; a, b, \alpha, \beta)$ с параметрами положения $a = 3$, $b = 15$ и параметрами формы $\alpha = 1$, $\beta = 6$.

Аналогично число выздоровевших может быть описано выражением

$$h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} D(\tau) \cdot G_2(t; \tau) d\tau, \quad (10)$$

где $G_2(t; \tau) = \varphi_{\tau}^B(t - \tau; a, b, \alpha, \beta)$ с параметрами положения $a = 11$, $b = 26$ и параметрами формы $\alpha = 4$, $\beta = 4$. Графики $G_1(t; \tau)$ и $G_2(t; \tau)$ представлены на рис. 2.

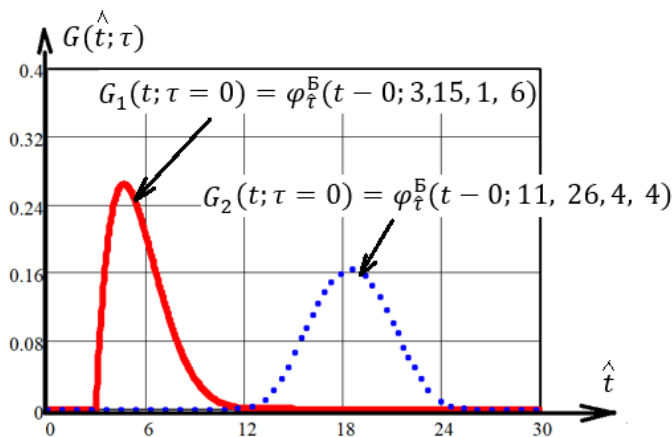


Рис. 2. Функции Грина, являющиеся плотностями распределения продолжительности латентного протекания заболевания COVID-19 и продолжительности периода выздоровления

Физический смысл функций Грина состоит в следующем. Если в момент $\tau = 0$ человек заразился, то плотность распределения латентного протекания заболевания подчиняется функции $G_1(t; \tau = 0) = \varphi_{\tau}^B(t - 0; 3, 15, 1, 6)$, а плотность распределения продолжительности заболевания (до выздоровления) подчиняется функции $G_2(t; \tau = 0) = \varphi_{\tau}^B(t - 0; 11, 26, 4, 4)$. Параметры законов распределения латентного протекания заболевания и продолжительности заболевания определены по данным сайта *стопкоронавирус.рф* [5].

Поскольку функция $D(\tau)$ имеет дискретный аргумент, а шаг дискретного аргумента равен $\Delta t = 1$, то интегралы (9) и (10) могут быть выражены следующим образом:

$$z(t) = \int_{-\infty}^{\infty} D(\tau) \cdot G_1(t; \tau) d\tau = \int_{\tau-15}^{\tau-3} D(\tau) \cdot \varphi_{\tau}^B(t - \tau; 3, 15, 1, 6) d\tau \approx \sum_{j=t-15}^{t-3} (D(j) \cdot \varphi_{\tau}^B(t - j; 3, 15, 1, 6) \cdot \Delta t) = \sum_{j=t-15}^{t-3} (D(j) \cdot \varphi_{\tau}^B(t - j; 3, 15, 1, 6)). \quad (11)$$

Аналогично

$$h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} D(\tau) \cdot G_2(t; \tau) d\tau \approx \sum_{j=t-26}^{t-11} (D(j) \cdot \varphi_{\tau}^B(t - j; 11, 26, 4, 4)). \quad (12)$$

Число заразившихся $D(\tau)$ может быть выражено для следующих трех случаев.

Первый случай – дистанционное обучение и проживание части курсантов в казармах, а части – в городе:

$$D(t) = p(t) \cdot S(t) \cdot \gamma \cdot (1 + \beta_c(b_c - 1)) + p(t) \cdot S(t) \cdot K(t) \cdot A(t) \cdot R \cdot (1 - \gamma) \times (1 + \beta_k(b_k - 1)), \quad (13)$$

- где
- $p(t)$ – вероятность заразится человеку в городе;
 - γ – доля проживающих в городе курсантов;
 - $S(t)$ – число восприимчивых к заражению курсантов;
 - $1 + \beta(b - 1)$ – коэффициент скученности, описывающий увеличение заражения при скученном проживании;
 - β_c, β_k – доли проживающих скученно в городе и казарме соответственно;
 - b_c, b_k – среднее число курсантов, проживающих группами скученно в городе и казарме соответственно;
 - $K(t)$ – число контактеров с подразделением;
 - $A(t)$ – численность административного персонала в академии;
 - R – коэффициент заражения контактеров и курсантов в процессе жизнедеятельности и проведения занятий.

Для данного случая заражение происходит путем заноса в отдельные группы вируса из города и от контактеров.

Второй случай – очное обучение и проживание как в казарме, так и в городе:

$$D(t) = p(t) \cdot S(t) \cdot \gamma \cdot (1 + \beta_c(b_c - 1)) + p(t) \cdot S(t) \cdot K(t) \cdot A(t) \cdot R \cdot (1 - \gamma) \times (1 + \beta_k(b_k - 1)) + L(t - 1) \cdot W, \quad (14)$$

- где
- $L(t - 1)$ – число латентных зараженных больных, являющихся источником заражения;
 - W – коэффициент contagiозности (заражения) латентным больным (например, $W = 0,2$, то 1 латентный больной за 5 суток заразит 1 человека).

Для данного случая заражение, в дополнение к путям заражения, свойственным первому случаю, происходит внутри коллектива на занятиях в условиях латентного протекания заболевания.

Третий случай – смешанный режим обучения, когда при проведении практических занятий режим обучения очный, а для теоретических занятий режим обучения дистанционный, проживание курсантов также в казарме и городе:

$$D(t) = p(t) \cdot S(t) \cdot \gamma \cdot (1 + \beta_c(b_c - 1)) + p(t) \cdot S(t) \cdot K(t) \cdot A(t) \cdot R \cdot (1 - \gamma) \times (1 + \beta_k(b_k - 1)) + I(t) \cdot L(t - 1) \cdot W, \quad (15)$$

где $I(t)$ – индикатор проведения практического занятия в день t :

$$I(t) = \begin{cases} 1, & \text{если в день } t \text{ практическое занятие проводится,} \\ 0, & \text{если в день } t \text{ практическое занятие не проводится.} \end{cases} \quad (16)$$

Функция изменения уровня латентного заболевания:

$$L(t) = L(t - 1) + D(t) - z(t). \quad (17)$$

Функция числа восприимчивых к заражению курсантов:

$$S(t) = S(t - 1) - D(t) - J(t), \quad (18)$$

где $J(t)$ – число курсантов, приобретших иммунитет в результате вакцинации.

Воспользовавшись аппаратом функций Грина, рассуждениями по выводу выражений (11) и (12), а также данными о формировании иммунитета после вакцинации запишем (для примера к вакцине «Спутник V»):

$$J(t) = 0,93 \int_{-\infty}^{\infty} V(\tau) \cdot G_3(t; \tau) d\tau \approx 0,93 \sum_{j=t-42}^t (V(j) \cdot \varphi_{\tau}^B(t - j; 0, 42, 1, 3)), \quad (19)$$

где $V(t)$ – число вакцинированных в день t . Значение 0,93 позволяет учесть то, что после двух вакцинаций компонентами вакцины «Спутник V» формируется иммунитет у 93% вакцинированных. Выражение (19) позволяет учитывать сформированный иммунитет при вакцинации в предыдущие дни.

Выражения (3)–(19) позволяют итерационно рассчитывать долю здорового личного состава в зависимости от двух типов факторов распространения коронавирусной инфекции. Во-первых, неуправляемых, а именно: характеристик контагиозности коронавируса, эпидемиологической обстановки в регионе, характеристик протекания заражения. Во-вторых, от управляющего воздействия со стороны руководства вуза с целью обеспечения выполнения стоящих задач, а именно: режима обучения, условий проживания, графика вакцинации, графика отпусков, «жесткости» санитарно-эпидемиологических мероприятий.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ УРОВНЯ ЗАБОЛЕВАЕМОСТИ

Результаты расчетов с использованием описанной выше модели достаточно хорошо соответствуют наблюдаемому уровню заболеваемости в учебном заведении. Далее приведем примеры расчетов с использованием приведенной модели.

На рис. 3,а представлены графики доли $\delta(t)$ здоровых курсантов на курсе для случаев 80 и 20% проживания личного состава в казарме ($\gamma = 0,2$ и $\gamma = 0,8$ соответственно) при следующих условиях: дистанционное обучение; $p(t) = 0,0006$; $K(t) = 4$; $M(t) = 300$; $R = 0,01$; $\beta_c = 0,5$; $b_c = 4$; $\beta_k = 0,7$; $b_k = 15$. Во-первых, максимальный уровень заболеваемости при характерных эпидемиологических условиях не превышает 15%. Во-вторых, при характерных эпидемиологических условиях, при организации дистанционного обучения, целесообразней организовать проживание курсантов распределенно в городе. Это соответствует выводам, приведенным в статье [5].

На рис. 3,б приведены графики расчетов $\delta(t)$ при тех же условиях, что и на рис. 3,а, но при 85% вакцинации личного состава. Из анализа графиков можно сделать следующие выводы. Во-первых, начальное падение $\delta(t)$ идентично случаю, представленному на рис. 3,а в связи с тем, что иммунитет формируется с некоторым запозданием: 7 – 15 суток. Во-вторых, по истечении 15 дней после вакцинации (начиная с 50-х суток) наблюдается более интенсивное уменьшение болеющего личного состава. В-третьих, продолжительность пика заболеваемости в 2 раза меньше при вакцинации, проведенной на 32-й день, чем при ее отсутствии.

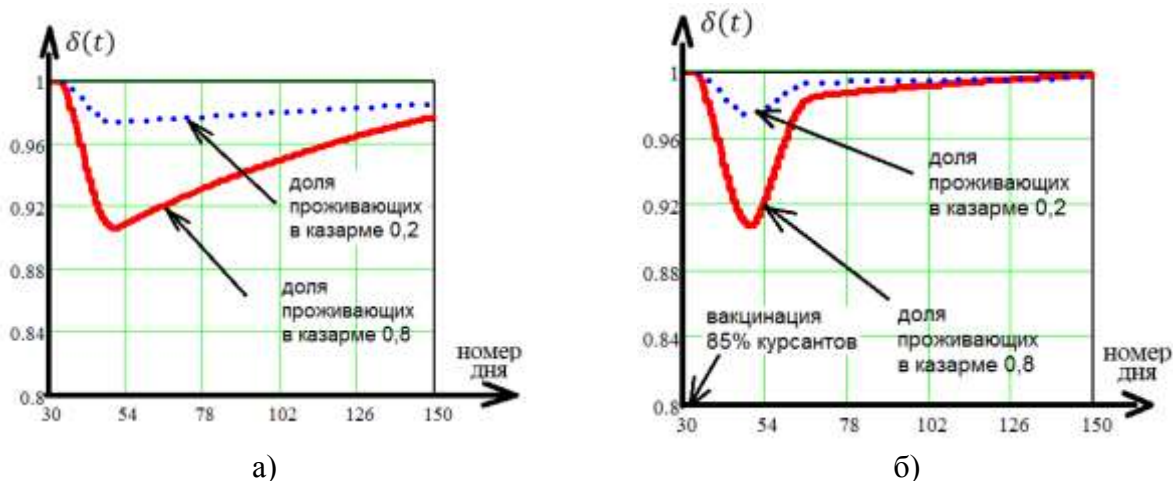


Рис. 3. Зависимость доли здоровых курсантов от номера дня для случаев $\gamma = 0,2$ (80% в казарме) и $\gamma = 0,8$ (20% в казарме):
 а – без вакцинации; б – при вакцинации на 32-й день 85% личного состава

На рис. 4 представлены графики заболеваемости, числа больных, числа заразившихся в течение одного дня, числа латентных больных при вероятности заражения в городе, равной $p(t) = 0,0006$, характерной для Санкт-Петербурга при заражении 3000 человек в сутки. На курсе 120 человек, режим обучения дистанционный, все курсанты проживают распределено в городе. Как следует из приведенных графиков, в заданных условиях при $W = 0,2$ и $\beta_c = 0$ курс переболеет приблизительно за 3,5 месяца.

На рис. 5 представлены графики рассчитанных долей $\delta(t)$ здоровых (не больных) курсантов при различных коэффициентах W контагиозности (заражаемости) коронавируса. Как следует из анализа данных графиков, в два раза большее значение W приведет к большему, максимальному количеству больных и более раннему моменту времени наступления «пика» максимального числа больных. Отметим, что W характеризует как особенности коронавируса, так и характер профилактических мероприятий противодействия распространению инфекции.

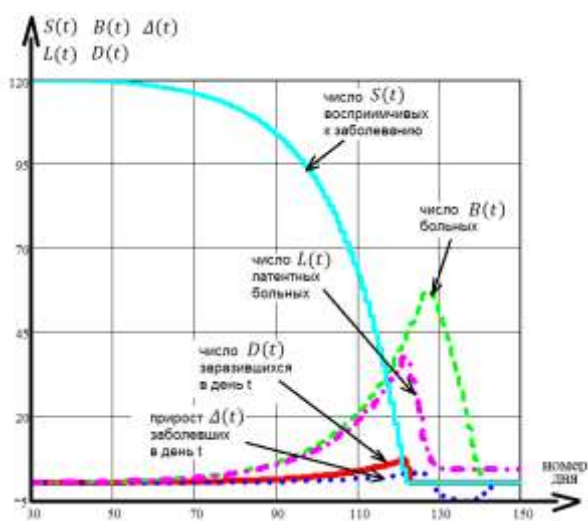


Рис. 4. Функции, характеризующие ситуацию с заболеваемостью, от номера дня для случая $\gamma = 1,0$ (все живут в городе)

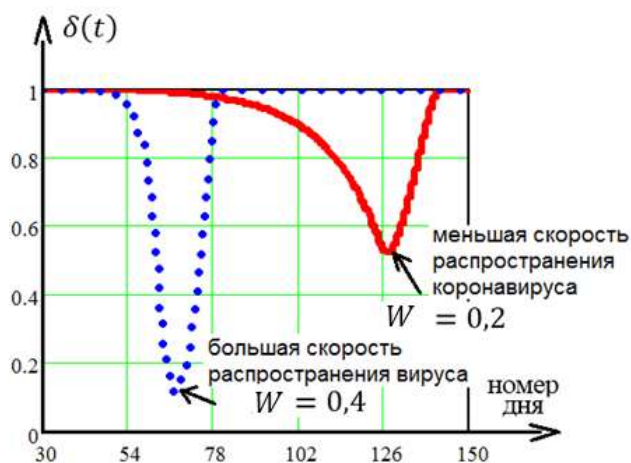


Рис. 5. Зависимость доли здоровых курсантов от номера дня для случаев $\gamma = 0,2$ (80% в казарме) и $\gamma = 0,8$ (20% в казарме) при различных коэффициентах распространения коронавируса

На рис. 6,а представлены графики функций от времени долей здоровых курсантов для двух случаев. Первый – обычный очный режим обучения при проживании в казарме. Второй – дистанционное обучение при проживании в казарме. Заражение происходит как в городе с вероятностью $p(t) = 0,0006$, так и в процессе контактов курсантов в казарме при латентном протекании заболевания. Как следует из анализа графиков, при дистанционном режиме обучения максимальная заболеваемость в первые месяцы эпидемии в два раза ниже.

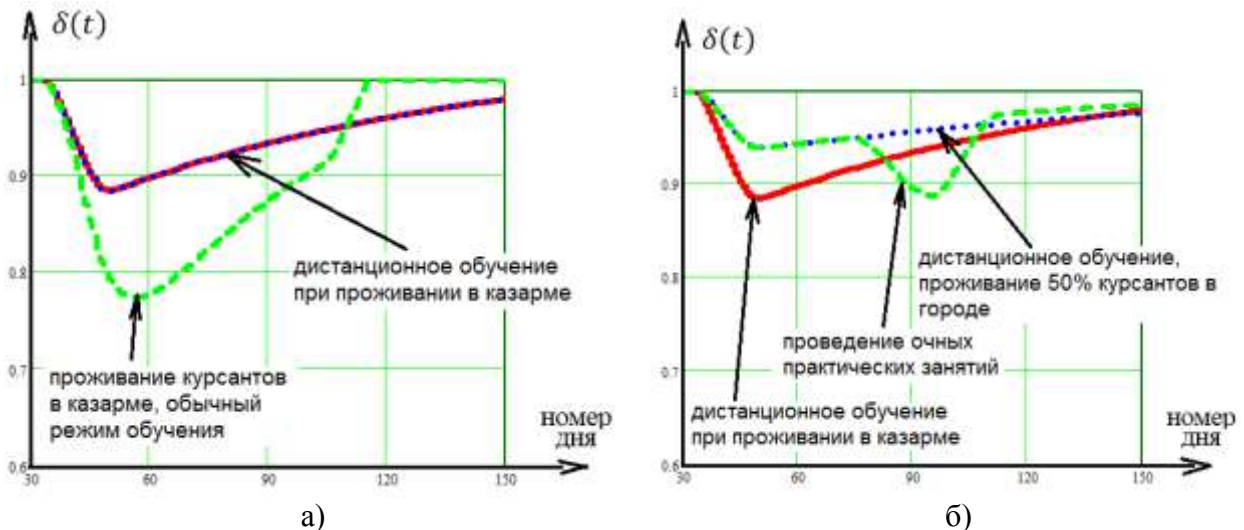


Рис. 6. Функции долей здоровых курсантов для различных режимов обучения: а – обычный режим и дистанционное обучение, проживание в казарме (условия расчета соответствуют рис. 3,б); б – дистанционное обучение и смешанное проживание (50% в городе); дистанционное обучение и проживание в казарме; смешанное проживание и смешанное обучение (теоретические курсы дистанционно, практические занятия с 70-го по 100-й день в очном формате)

На рис. 6,б представлены графики $\delta(t)$ для трех случаев. Первый – это дистанционное обучение при проживании в казарме. Второй – дистанционное обучение при проживании 50% курсантов в городе и 50% в казарме. Третий – проживание 50% курсантов в городе, 50% в казарме при проведении теоретических занятий в дистанционном режиме, а практических (например, на военной технике) в очном. Как следует из результатов расчетов, очный режим проведения практических занятий приводит к повышению заболеваемости с некоторым запаздыванием после проведения занятий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в результате моделирования оценки заболеваемости в условиях характерного действия факторов, влияющих на распространение коронавируса, соответствуют наблюдаемым описаниям заболеваемости коронавирусом. Например, при увеличении контагиозности штаммов коронавируса уменьшается период от начала очередной волны коронавируса до наступления момента с максимумом заболевших.

В работе не рассматриваются медицинские аспекты противодействия коронавирусу, а именно качество лечения, качество вакцины и т. п. Однако эти факторы могут быть учтены в качестве исходных данных для моделирования распространения коронавируса в вузе. Например, продолжительность лечения коронавируса, эффективность действия вакцины и ход формирования иммунитета после вакцинации учтены в предлагаемой модели.

Моделирование заболеваемости с использованием предложенной модели позволяет также делать качественные выводы о необходимых мерах при выборе формы обучения. Так, при резком увеличении заболеваемости в районе расположения вуза, целесообразно незамедлительно переходить на дистанционное обучение и рассредоточенное проживание, что позволит избежать массового одномоментного заболевания. Использование предложенной модели позволяет определить чувствительность характеристик заболеваемости в вузе (доля заболевших, число больных, число заражаемых и т. п.) от управляемых факторов (форма обучения, расписание занятий, скорость выявления и изоляции больных и т. п.) организации обучения в вузе.

Таким образом, в статье предложена формализованная постановка задачи организации образовательного процесса в вузе в условиях пандемии коронавируса, которая, совместно с предложенной моделью расчета заболеваемости курсантов с учетом факторов, влияющих на распространение коронавируса в вузе, позволяет в дальнейшем сформулировать задачу оптимального выбора формы организации образовательного процесса в условиях коронавируса.

Список используемых источников

1. *Kermack W. O., McKendrick A. G.* A contribution to the mathematical theory of epidemics. // *Proceedings of the Royal Society.* – 1927. – № 115. – P. 700–721.
2. Руководство по порядку действий должностных лиц при ухудшении санитарно-эпидемиологической обстановки. – М.: МО РФ, 2020. – 8 с.
3. *Петухов Г. Б., Девяткин А. М., Якунин В. И.* Идентифицирование законов распределения ограниченных случайных величин: учеб.-методическое пособие. – СПб.: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2004. – 30 с.
4. *Зельдович Я. Б., Мышкис А. Б.* Элементы прикладной математики. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1972. – 372 с.
5. *Гнидко К. О., Макаров С. А., Нагорный Д. С.* Поддержка принятия решения о введении особых режимов в вузах Министерства обороны Российской Федерации // *Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского.* – 2021. – Вып. 678. – С. 346–355.
6. *Леоненко В. Н.* Математическая эпидемиология: учеб.-методическое пособие. – СПб.: Университет ИТМО, 2018. – 38 с.
7. School closures and influenza: systematic review of epidemiological studies / E. Vynnycky [et al.] // *BMJ Open.* – 2013. – № 3. – e002149.
8. School closures during the flu pandemic / S. Cauchemez [et al.] // *The Lancet Infectious Diseases.* – 2009. – № 9. – P. 473–481.
9. *Бутсма М. С., Фергюсон Н. М.* Влияние мер общественного здравоохранения на пандемию гриппа 1918 года в городах США // *Труды Национальной академии наук США.* – 2007. – № 104. – С. 88–93.
10. The effective reproduction number of pandemic influenza: prospective estimation / B. J. Cowling [et al.] // *Epidemiology.* – 2010. – № 21(6). – P. 842–846.
11. School closures and mitigation of pandemic (H1N1) 2009, Hong Kong. / J. T. Wu [et al.] // *Emerging Infectious Diseases.* – 2010. – № 16. – P. 538–541.

В. Л. Кабалин,
кандидат военных наук, доцент;
В. Н. Прищепа,
кандидат военных наук;
А. В. Северенко,
кандидат технических наук

ПРОБЛЕМНЫЕ АСПЕКТЫ УПРАВЛЕНИЯ БОЕВОЙ ПОДГОТОВКОЙ В УСЛОВИЯХ ЕЕ ИНТЕНСИФИКАЦИИ И ПОДХОДЫ К ИХ РЕШЕНИЮ

В статье обоснован понятийный аппарат, адаптированный под задачи интенсификации боевой подготовки. Приведен вариант подхода к моделированию управляемого процесса воинского обучения. Даны рекомендации по планированию мероприятий боевой подготовки и направления дальнейших исследований в интересах повышения ее эффективности.

Ключевые слова: интенсификация боевой подготовки, производительность, интенсивность, результативность и действенность учебных мероприятий, эффективность учебного процесса, напряженность учебной деятельности.

ВВЕДЕНИЕ

Динамика развития военно-политической обстановки (ВПО) в современном мире не дает основания рассчитывать на ослабление напряженности между ведущими игроками на политической арене, что повышает вероятность возникновения военных конфликтов. Исторический опыт показывает, что совершенствование средств вооруженной борьбы влечет за собой повышение требований к боевой выучке и чем выше эти требования, тем жестче требования к боевой подготовке (БП) войск, особенно в связи с тенденцией перехода преимущественно на контрактный принцип комплектования ВС РФ.

Указанные обстоятельства определили появление в начале XXI века новой Концепции боевой подготовки. Ее основное требование – интенсификация процесса формирования боевой выучки войск. **Интенсификация БП** есть повышение ее производительности, действенности и результативности при сокращении времени на достижение результата [1]. Из определения следует, что интенсификация – это способ повышения эффективности БП.

Механизм реализации базового требования Концепции БП – интенсификации – в указанном руководящем документе не рассматривается, что определяет **первый проблемный аспект** решения задачи. Попытка интерпретации рассматриваемого понятия содержится в указаниях начальника Главного управления боевой подготовки Генерального штаба ВС РФ [2], однако в этом документе термин *интенсификация* заменен не вполне соответствующим ему термином *интенсивность* [3], что может сделать излагаемые в указаниях методические рекомендации неэффективными. При этом сами рекомендации, суть которых составляет технология *модульного обучения* [4], также не содержат механизма решения задачи *интенсификации*, поскольку не предусматривают каких-либо показателей и критериев, пригодных для формирования системы управления процессом БП, существенно отличающимся от обучения и воспитания в образовательных системах. Указанные обстоятельства формируют **второй проблемный аспект**.

Таким образом, целью исследований, результаты которых приведены в данной статье, является повышение боевой выучки войск. Объектом исследования выбран процесс БП, а предметом – технология управления этим процессом. Научная задача состоит в разработке научно-методического аппарата управления БП, отвечающего требованиям Концепции БП.

В педагогике рассматривается понятие *интенсификации учебно-воспитательного процесса*, суть которого определяется как повышение *интенсивности, напряженности, производительности, действенности* учебной деятельности за счет *более полного использования каждой единицы ресурсного потенциала*. При этом основу технологии интенсификации составляют интенсивные методы обучения [4]. Принципиального отличия в формулировках обоих понятий нет. Однако субъективно выбираемые интенсивные приемы и способы обучения не позволяют обеспечить требуемую интенсификацию процесса БП. Для решения указанной выше научной задачи уточним содержание понятия *интенсификация*.

Эффективность БП (по аналогии с эффективностью образования [4]) – это оценочная категория, характеризующая результаты учебной деятельности по критерию их соответствия поставленным целям. В нашем случае цели заданы понятием *результативность* (достижимый результат) и таким условием, как минимизация времени.

Результативный – дающий хороший *результат* (не хуже имевшегося без дополнительных усилий или допустимо хуже при экономии усилий) [5]. Тогда *результативность* должна отражать соотношение достигнутого результата выучки (r_t) в конце проведенного мероприятия БП и имевшегося исходного результата на начало проведения мероприятия БП (r_0).

Производительность труда (в том числе учебного) – эффективность труда в процессе БП. Измеряется количеством времени, затраченного на отработку одной учебной задачи (вводной, действия, норматива и др.), или количеством правильных решений (действий), произведенных в единицу времени (учебный час) [3].

Действенность – способность воздействовать, побуждать добиваться необходимого результата, приводить к результату. Способный – имеющий возможность произойти, но с некоторой неопределенностью исхода, вероятный, допустимый [5]. Тогда действенность мероприятия БП должна отражать прогнозируемую (ожидаемую) результативность (K_d).

Анализ логической связи рассмотренных терминов и определений позволяет принять за контролируемые показатели БП действенность и результативность (K_r), а за регулируемый параметр – производительность (n/t). Технология достижения целей базируется на производительности, результатом которой является действенность, а следствием – результативность.

Актуальность данного исследования определяется динамикой развития ВПО, а практическая значимость – возрастанием требований к БП, что отражено в руководящих документах и требованиях Верховного Главнокомандующего ВС РФ В. В. Путина (приоритеты развития ВС РФ на 2022 год, определенные на расширенной коллегии МО РФ в декабре 2021 года).

УПРАВЛЕНИЕ БОЕВОЙ ПОДГОТОВКОЙ В УСЛОВИЯХ ЕЕ ИНТЕНСИФИКАЦИИ

Анализ принятой нами терминологии дает основание полагать, что интенсификация есть способ достижения цели, а производительность, интенсивность, напряженность и экономия ресурсов – взаимозависимые условия его реализации. При этом действенность и результативность мероприятий БП являются индикатором и показателем эффективности БП соответственно. Результативность будет отражать реализованную действенность, а действенность – прогнозируемую результативность. Регулируемыми параметрами будут K_d и n_i/t_i , а достигаемый эффект определяют K_r и Σt . В этом – суть принятой нами ГИПОТЕЗЫ.

Интенсификация БП предполагает интенсификацию деятельности обучающихся и обучаемых. Эта деятельность представляет собой процесс решения теоретических и (или) практических учебных задач [4, 6]. Поэтому факторами, определяющими ее успешность, будут являться: компетентность руководителя занятия (K_p), подготовленность обучаемых (K_r), полнота обеспечения (методического и материально-технического, включая УМБ) занятия ($K_{об}$), достаточность времени на отработку учебных задач (K_T). Предлагаемые показатели характе-

ризуют качество учебного процесса и являются исходными данными для планирования БП. Величину каждого определит соотношение его фактического и требуемого значений.

Так, показатель компетентности руководителя занятия определится отношением

$$K_p = k_{рф} / k_{рт}, \quad (1)$$

где K_p – значение качественной характеристики обучающего, переведенной в количественную величину посредством вербально-числовой шкалы Е. Харрингтона [7].

Значение $K_{об}$ определяется аналогично показателю компетентности руководителя:

$$K_{об} = k_{обф} / k_{обт}. \quad (2)$$

Показатель K_T является одним из факторов, характеризующих сложность решаемых учебных задач, поэтому его целесообразно учитывать при определении уровня подготовленности обучаемых. Тогда значение показателя K_r будет определяться соотношением фактических уровней обученности личного состава $k_{рф}$ и сложности решаемой ими задачи $k_{лф}$:

$$K_r = k_{рф} / k_{лф}, \quad (3)$$

где k_r – уровень обученности номера расчета (слаженности расчета в целом), определяемый его оценкой, переведенной в вероятностную величину с помощью шкалы Е. Харрингтона;

k_l – уровень сложности решаемой задачи, выраженный качественно и переведенный в количественное значение по шкале Е. Харрингтона.

Он характеризует напряженность учебного процесса и определяется по трем частным показателям (признакам), к которым относятся:

- 1) логическая сложность задачи k_v отражает соотношение требуемого объема информации v_m для принятия решения на действие и фактически доведенного обучаемым $v_{ф}$;
- 2) временная сложность условий решения задачи k_t – это соотношение располагаемого t_p и потребного t_n времени для решения задачи;
- 3) психологическая сложность условий решения задачи k_y характеризует сложность условий моделируемой тактической обстановки (опасность, тяжесть, напряженность и др.).

Значение обобщенного показателя сложности задачи k_l определяется путем свертки частных показателей по правилу исчисления средневзвешенного значения набора вещественных чисел [8]:

$$k_l = 1 / (c_v / k_v + c_t / k_t + c_y / k_y), \quad (4)$$

где c_i – коэффициенты значимости того или иного признака (k_v , k_t , k_y) по степени влияния на решение задачи (определяются жесткостью требований к подготовленности личного состава и устанавливаются экспертным путем или по опыту предыдущего периода обучения).

В случае, когда во время занятия решалось несколько задач, обобщенное значение k_l будет определяться путем свертки показателей уровня сложности всех задач (4). При этом для каждой задачи будет устанавливаться коэффициент ее значимости в структуре модуля или комплексной тактической задачи (КТЗ) [2].

При отработке задач слаживания, в которых участвует личный состав расчета (формирования), уровень боевой выучки расчета будет определяться его обобщенной оценкой или сверткой оценок каждого номера расчета.

Рассмотренные показатели качества учебного процесса являются относительными и измеряются в интервале от 0 до 1. Для их перевода в качественную характеристику при подведении итогов или представлении донесений также используется шкала Харрингтона. Требуемые значения принятых показателей при планировании БП могут рассматриваться как исходные константы и принимать минимальное (допустимое), среднее и максимальное (предельное) значения. Фактические значения показателей являются регулируемыми величинами при управлении БП. При данном допущении вероятность негативного исхода учебного про-

цесса в ходе одного мероприятия БП (занятия) по причине недостаточности любого одного из показателей его качества будет определяться зависимостью

$$P_{\text{ни}} = \exp(-k_{\text{ф}}/k_{\text{т}}). \quad (5)$$

Вероятность негативного исхода может принимать максимальное значение, близкое к 1,0 при $k_{\text{ф}} \ll k_{\text{т}}$, и минимальное значение – при $k_{\text{ф}} \gg k_{\text{т}}$. При условии $k_{\text{ф}} = k_{\text{т}}$ значение $P_{\text{ни}}$ будет равно $1/a$, где a является основанием экспоненциальной зависимости (обычно его принимают за $e = 2,71828$, если в вычислениях используются натуральные логарифмы; в экспоненциальной зависимости может использоваться и основание, не равное числу e , но тогда придется использовать модуль перехода $\log_a e$). Выбор основания зависит от того, какое его значение будет более соответствовать математической модели описываемого показателя. Тогда положительный исход учебного процесса определяется выражением

$$P_{\text{ни}} = 1 - \exp(-k_{\text{ф}}/k_{\text{т}}). \quad (6)$$

Таким образом, вероятность решения учебной задачи при соответствующей компетентности руководителя будет определяться следующим выражением:

$$P(K_{\text{р}}) = 1 - \exp(-k_{\text{рф}}/k_{\text{рт}}). \quad (7)$$

Вероятность решения учебной задачи при соответствующей подготовленности обучаемых будет определяться зависимостью

$$P(K_{\text{р}}) = 1 - \exp(-k_{\text{рф}}/k_{\text{рт}}). \quad (8)$$

Вероятность решения учебной задачи при соответствующем обеспечении учебного процесса будет определяться зависимостью

$$P(K_{\text{об}}) = 1 - \exp(-k_{\text{обф}}/k_{\text{обт}}). \quad (9)$$

Зависимости (7)–(9) характеризуют частные гипотезы рассмотренных событий [9], условные вероятности которых могут определяться экспертным путем по признаку значимости каждого показателя качества учебного процесса. Тогда полная вероятность положительного решения учебной задачи определится выражением вида

$$P(K_{\text{р}}, K_{\text{об}}, K_{\text{р}}) = c_{\text{р}}P(K_{\text{р}}) + c_{\text{об}}P(K_{\text{об}}) + c_{\text{р}}P(K_{\text{р}}). \quad (10)$$

Если в ходе мероприятия БП планируется решение несколько учебных задач, то полная вероятность их положительного решения будет вычисляться по правилу уже известной нам свертки и отражать действенность планируемого мероприятия. Прогнозировать действенность комплекса мероприятий БП, в ходе которых планируется решение конечного множества учебных задач, можно аналогичным образом. Данный вывод базируется на допущении о том, что действенность отражает соотношение решенных задач к числу решавшихся в заданном интервале времени (продолжительности одного или комплекса мероприятий БП).

При принятых допущениях производительность учебной деятельности $K_{\text{пр}}$ правомерно моделировать ожидаемым количеством решенных задач n в единицу времени t (учебный час), а интенсивность $K_{\text{ин}}$ – количеством запланированных задач m на то же время t . Если учесть, что *действенность*, как величина вероятностная, может определяться частотой появления положительно решенных учебных задач n (положительных результатов испытаний) из общего числа m решаемых задач (испытаний) [3], то показатель *действенности* будет иметь вид $K_{\text{д}} = n/m$, что вытекает из следующей зависимости:

$$K_{\text{д}} = K_{\text{пр}}/K_{\text{ин}} = (n/t)/(m/t) = n/m, \quad (11)$$

где $K_{\text{пр}}$ – производительность учебной деятельности на конкретном занятии, $K_{\text{пр}} = n/t$;

$K_{\text{ин}}$ – интенсивность учебной деятельности на конкретном занятии, $K_{\text{ин}} = m/t$.

Из выражения (11) можно определить действенность как отношение производительности учебного процесса к его интенсивности. Увеличение интенсивности ведет к снижению действенности мероприятий БП, а повышение производительности – к ее увеличению.

Действенность проведенного мероприятия ($K_{\text{пр}}$) будет определяться выражением

$$K_{\text{пр}} = n'/m, \quad (12)$$

где n' – количество решенных задач в ходе мероприятия БП.

Поскольку результативность, согласно принятому нами допущению, есть отношение достигнутого на момент завершения мероприятия БП результата r_t к исходному результату на начало указанного мероприятия r_0 , то показатель прогнозируемой действенности, или результативности ($K(r_t, r_0)$) может быть выражен вероятностной зависимостью:

$$P(r_0, r_t) = 1 - \exp(-r_0/r_t). \quad (13)$$

Выражение (13) отражает взаимосвязь исходного и конечного результатов подготовленности обучаемых: вероятность достижения желаемого (целевого) результата тем ниже, чем ниже исходный уровень, или выше целевой.

Таким образом, интенсификация БП представляет собой комплекс мероприятий по организации и руководству воинским обучением личного состава, слаживанием формирований боевого расчета подразделений, воинских частей, соединений и их органов управления с целью достижения требуемых показателей боевой выучки. Этот комплекс включает:

- совершенствование деятельности должностных лиц управления воинской части по организации БП и руководству ею, исключение необъективных оценок мероприятий БП или попыток их подмены фотоотчетами и формальными донесениями о ходе БП;

- резервирование дополнительного времени на подготовку обучаемых, стимулирование их деятельности в процессе боевой учебы, исключение отрыва личного состава от занятий, и (или) срывов мероприятий БП;

- повышение компетентности руководителей в ходе профессионально-должностной подготовки, стимулирования их служебной деятельности и активизации работы методического совета воинской части;

- развитие учебной материальной базы и повышение уровня всестороннего обеспечения мероприятий БП.

Последовательность приведенных мероприятий отражает их приоритетность.

Предлагаемый подход ориентирован на его применение в ходе планирования БП и регулирования процесса обучения.

Исходными данными для планирования являются достигнутые результаты предыдущего периода обучения и поставленные старшим начальником задачи. Достигнутые результаты представляют фактическое значение показателей $K_{\text{рф}}$, $K_{\text{рф}}$, $K_{\text{обф}}$, определяющих задачи (требуемое значение r_t). Нормативными исходными данными будут время на БП T_n и количество предусмотренных программой БП задач m_i для каждого занятия и всего по предмету БП M_n .

Методика планирования предполагает оценку достижимости цели $P(r_{0t}/r_t, l_m, \Sigma t_i)$ и достаточности условий для этого ($K_{\text{рф}}$, $K_{\text{рф}}$, $K_{\text{обф}}$); расчет усредненных плановых показателей m_i/t_i для каждого занятия по конкретному предмету БП, начиная с базового (в войсках – тактическая подготовка), и прогнозирование значений контрольных индикаторов n_i/m_i , t_i и показателей r_t , l_t , Σt_i .

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПЛАНИРОВАНИЯ

Для проверки принятой гипотезы проведем оперативный расчет параметров планирования по описанной выше методике (применяется при принятии решения на организацию БП).

Зададим исходные условия и определим достижимости цели: $r_t = 5,0$ (по шкале Харрингтона – 0,9), $r_0 = 4,0$ (по Харрингтону – 0,7), l_Φ соответствует k_r , $\Sigma t_i \rightarrow \min (\Sigma t_i < T_n)$. Используя выражение (13), найдем вероятность успеха:

$$P(r_0, r_t) = 1 - \exp(-0,7/0,9) = 1 - 1/e^{0,8} = 1 - 1/2,22 = 1 - 0,45 = 0,55.$$

При таком значении $P(r_0, r_t)$ по шкале Харрингтона предварительный вывод будет означать, что достижение цели не гарантировано (при ее определении, возможно, штабом старшего начальника были сделаны некоторые неправильные выводы). Более правильным было бы определить $r_t = 4,0$. Тогда

$$P(r_0, r_t) = 1 - \exp(-0,7/0,7) = 1 - 1/e^1 = 1 - 1/2,71 = 1 - 0,37 = 0,63.$$

Это означает, что реально достижимая цель – удержать достигнутые результаты.

Определим достижимость цели при более благоприятных условиях: $(k_\Phi/k_T = 0,9/0,9)$, $(K_p) = P(K_{об}) = 0,63$, $P(K_r) = 0,55$. Воспользуемся выражением (10) и вычислим полную вероятность успеха:

$$P(K_p, K_{об}, K_r) = 0,3 \cdot 0,63 + 0,2 \cdot 0,63 + 0,5 \cdot 0,55 = 0,19 + 0,13 + 0,27 = 0,59,$$

что не гарантирует конечный результат. Если для K_p и $K_{об}$ допустить более реальное соотношение $(k_\Phi/k_T = 0,7/0,9)$, то значение $P(K_p, K_{об}, K_r)$ будет не выше 0,54.

Итак поставленная цель выполнима более или менее при благоприятных условиях: $P(K_p) = P(K_{об}) = P(r_0, r_t) = 0,63$, что на практике встречается редко, если исключить необоснованное занижение уровня сложности решаемых задач (искусственное повышение $P(K_r)$).

Далее при планировании определяют прогнозируемое количество успешно отработанных к концу учебного периода (года или полугодия) задач $N = P(K_p, K_{об}, K_r) \cdot M_n$, требуемую производительность N/T_n и интенсивность M_n/T_n для нормативных (программных) M_n и T_n .

Приведенные расчеты выполнены с использованием экспоненциальной зависимости по основанию «e». Для основания «10» значение вероятности достижения цели возрастает до 0,84. Значение основания экспоненты может быть и иным, его определяют опытным путем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренный подход к решению задачи интенсификации БП и представленные расчеты подтверждают возможность реализации принятой гипотезы при определенных условиях (исходных данных и соответствующей им цели). Для получения более полного доказательства и определения основания экспоненты необходимо проведение войскового эксперимента.

Вполне возможно, что изложенный подход к решению задачи интенсификации процесса воинского обучения может быть использован и в образовательном процессе в вузах МО РФ.

Список используемых источников

1. О Концепции боевой подготовки Вооруженных Сил Российской Федерации: приказ МО РФ № 71 от 31.01.2000. – URL: <http://voenprav.ru/doc-1152-1/htm> (дата обращения: 15.05.2019).
2. Методические рекомендации по основам организации подготовки подразделений, укомплектованных военнослужащими, проходящими службу по контракту: указания начальника Главного управления боевой подготовки ВС РФ № 373/3/4456дсп от 19.09.2018. – М., 2018. – 37 с.
3. Новая иллюстрированная энциклопедия: в 20 кн. – М.: Большая Российская энциклопедия, 2003. – Кн. 4. – 256 с.

4. Педагогика: большая современная энциклопедия / сост. Е. С. Рапоцевич. – Мн.: Современ. Слово, 2005. – 720 с.
5. *Ожегов С. И.* Толковый словарь русского языка. – М.: Большая советская энциклопедия, 1992. – 874 с.
6. Большая психологическая энциклопедия. – М.: Эксмо, 2007. – 544 с.
7. *Литвак Б. Г.* Наука управления: теория и практика. – М.: ИД Дело РАН Х и ГС, 2010. – 424 с.
8. *Грэхем Р., Кнут Д., Паташник О.* Конкретная математика. Математические основы информатики: пер. с англ. – М.: Мир, 2015. – 784 с.
9. *Балакин В. Б., Богатырев Г. И.* Высшая математика. – 2-изд. – МО СССР, 1980. – 288 с.

А. В. Соловьев,
кандидат технических наук;
Р. М. Хрущ,
кандидат технических наук, доцент

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОЦЕНИВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ СПЕЦИАЛЬНЫХ ДИСЦИПЛИН КАФЕДРЫ ФОТОТОПОГРАФИИ И ФОТОГРАММЕТРИИ

Выполнен анализ традиционного оценивания результатов промежуточной аттестации, которая играет важную роль в системе контроля профессиональной подготовки обучающихся. После этого предложено использовать для оценивания результатов промежуточной аттестации накопительную систему баллов.

Ключевые слова: система контроля успеваемости, качество подготовки, текущий контроль успеваемости, рубежный контроль, промежуточная аттестация, накопительная система баллов.

ВВЕДЕНИЕ

К выпускникам академии, как и выпускникам других образовательных учебных заведений МО Российской Федерации, предъявляются высокие требования к качеству подготовки. На результаты обучения оказывают влияние многие факторы: планирование и организация учебного процесса, квалификация преподавательского состава, применяющиеся образовательные технологии, состояние учебно-материальной базы, система контроля качества подготовки и др.

Контроль успеваемости и качества подготовки обучающихся включает текущий контроль успеваемости, промежуточную аттестацию обучающихся и государственную итоговую аттестацию [1]. Государственная итоговая аттестация играет особую роль, так как она не только оценивает качество сформированности необходимых выпускникам компетенций и их готовность к выполнению служебных обязанностей в войсках, но и дает оценку в целом образовательному процессу вуза.

Компетенции определяются федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования (ФГОС ВО) по специальности и квалификационными требованиями к военно-профессиональной подготовке выпускников по данной специальности (специализации), утверждающимися приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Отдельные компетенции формируются, как правило, в результате освоения нескольких учебных дисциплин. Планируемые результаты освоения учебных дисциплин и их перечень указываются в рабочей программе данной дисциплины. Отсюда очевидно, что решающая роль в формировании компетенций выпускника зависит от освоения задействованных дисциплин. Поэтому контроль освоения той или иной учебной дисциплины приобретает особую важность.

Виды контроля, их содержание и метод реализации регламентируются федеральными законами и ведомственными актами [1, 2]. В настоящей статье рассматриваются принципиальные положения и особенности промежуточной аттестации, организуемой на кафедре фототопографии и фотограмметрии по профильным дисциплинам в соответствии с «Методикой интегрированного оценивания результатов обучения с целью определения уровня сформированности профессиональных и профессионально-специализированных компетенций выпускников 7-го факультета» (далее – Методика). При этом оставляем за скобками задачу контроля сформированности компетенций выпускников, которая является предметом особого разговора.

Указанная Методика была разработана и принята по результатам методических экспериментов, проведенных на кафедре фототопографии и фотограмметрии (2017) и на факультете (2018–2020).

О РОЛИ И ЗНАЧЕНИИ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

Контроль успеваемости и качества подготовки обучающихся, как отмечено выше, включает, кроме государственной аттестации, промежуточную аттестацию обучающихся и текущий контроль успеваемости.

Об особой роли и значении промежуточной аттестации свидетельствует тот факт, что в федеральном законе «Об образовании в Российской Федерации» [1] ей отводится отдельная статья (ст. 58), в которой сказано:

«Освоение образовательной программы..., в том числе отдельной части или всего объема учебного предмета, курса дисциплины (модуля) образовательной программы, сопровождается промежуточной аттестацией обучающихся, проводимой в формах, определенных учебным планом, и в порядке, установленном образовательной организацией».

Таким образом, образовательное учреждение имеет право выбирать форму и порядок проведения промежуточной аттестации. Разумеется, что при этом не снимается ответственность с образовательного учреждения за обеспечение должного качества обучения. Качество обучения должно соответствовать компетентностной модели выпускника определенной специальности (специализации), другими словами, у выпускника к государственной итоговой аттестации должны быть сформированы соответствующие компетенции.

Текущий контроль успеваемости осуществляется для проверки хода и качества усвоения учебного материала, стимулирования учебной деятельности обучающихся, совершенствования методики проведения занятий и проводится в ходе всех видов занятий в форме, предусмотренной тематическим планом или избранной преподавателем. Результаты текущего контроля успеваемости отражаются в журнале учета учебных занятий и используются учебно-методическим центром (отделом), факультетами и кафедрами для оперативного управления образовательным процессом [2]. Видами текущего контроля являются рубежный контроль и контрольные работы (занятия).

Рубежный контроль осуществляется с целью систематической проверки достижения обучающимися обязательных результатов обучения по дисциплине – минимума, который необходим для дальнейшего обучения, выполнения программных требований к уровню подготовки обучающихся. Рубежный контроль проводится по завершении изучения отдельных наиболее сложных и объемных тем, разделов учебной дисциплины. Материалы, подтверждающие прохождение обучающимися рубежного контроля, хранятся на кафедре и подлежат уничтожению после проведения промежуточной аттестации по дисциплине [2].

Контрольные работы (занятия) выполняются в виде письменных ответов на вопросы, решения задач, выполнения контрольных заданий или практической проверки выполнения обучающимися упражнений, приемов и нормативов. Контрольные работы (занятия) могут проводиться в электронной форме. Содержание заданий на контрольную работу (занятие) и порядок ее выполнения устанавливаются кафедрой (предметно-методической комиссией).

В качестве рубежного контроля используются семинары и другие виды занятий. Рассмотрим формы рубежного контроля на примере учебной дисциплины «Фотограмметрия». Дисциплина изучается в 3–9 семестрах (общий объем – 648 часов, 18 з. е.). Кроме семинаров, которые применяются для контроля усвоения теоретических положений основных тем и разделов (усвоения знаний), имеется около десятка лабораторных и практических работ. Лабораторные (практические) работы по данной дисциплине (и по другим специальным дисциплинам 7-го факультета) включают по несколько 4–6-часовых занятий, на которых отрабатываются технологические процессы создания различных видов геопространственной

информации. Каждая работа заканчивается защитой отчета, по результатам которой выставляется оценка в журнал.

Поэтому, если результаты оценок по семинарам служат рубежным контролем усвоения знаний (теории) по дисциплине, то оценки за выполнение подобных работ используются в качестве рубежного контроля сформированности практических умений и навыков. Следовательно, по дисциплине «Фотограмметрия», как и по другим подобным специальным дисциплинам, нет надобности проводить контрольные занятия (работы).

В то же время качество подготовки курсанта по соответствующей дисциплине оценивается по результатам промежуточной аттестации (зачет с оценкой или экзамен). Именно оценка за промежуточную аттестацию отражается в дипломе. Следовательно, оценка за экзамен (зачет с оценкой) определяет качество подготовки обучающегося.

Закономерно возникает вопрос: отражает ли адекватно промежуточная аттестация качество подготовки выпускника? Попытаемся внести ясность в данный вопрос. Во-первых, текущая успеваемость, включающая не один рубежный контроль, на которых проверяются основные этапы усвоения дисциплины, никак не влияет на промежуточную аттестацию, так как она с ней не связана (рис. 1). Во-вторых, с физиологической точки зрения существует два вида памяти – кратковременная и долговременная. Если информация нужна человеку на короткое время (сдача экзамена), то она может «растаять» за несколько часов. Информация, переведенная в долговременную память (повторением и применением), может сохраняться практически всю жизнь. Запас знаний, приобретенный обучающимся систематической учебой, солиднее и прочнее. К тому же оценка, которую получает обучающийся на экзамене, является результатом кратковременного общения с преподавателем (10–15 минут) и зависит от многих случайных факторов: удачный или неудачный билет (по мнению сдающего), состояние сдающего (и экзаменатора) и т. п. Билет содержит обычно три вопроса – два теоретических и один практический (задачу). Поэтому под большим вопросом остается корректность оценки практических умений и навыков по ответу на единственный вопрос (а ведь практической подготовке должен отдаваться приоритет).



Рис. 1. Отсутствие связи между текущим контролем успеваемости и промежуточной аттестацией

Таким образом, промежуточная аттестация в традиционном ее оценивании, которое реализуется так, как описано выше, не очень объективно отображает реальные знания, умения и навыки обучающегося, в особенности – его практическую подготовку. Это крайне важно для выпускников (инженеров) специализаций геодезической направленности, которые в перспективе должны будут создавать реальную продукцию – различные виды геопространственных данных (топографические и специальные карты, цифровые модели местности и

т. п.). В то же время имеются фактические результаты их достижений как в теории (оценки по семинарам), так и по уровню приобретенных умений и навыков (оценки по практическим и лабораторным работам). Сама логика усвоения профильных дисциплин требует учета фактических результатов частных оценок при оценивании уровня усвоения дисциплины (модуля) в целом. Другими словами, результаты текущего контроля должны учитываться при промежуточной аттестации. Методические аспекты решения этого вопроса исследовались в упомянутых методических экспериментах и изложены в Методике. Принципиальные вопросы применения Методики при оценивании результатов промежуточной аттестации рассматриваются в статье.

О НАКОПИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ ОЦЕНИВАНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

Примерно с 2000-х гг. в педагогической литературе широко обсуждается вопрос перехода к балльно-рейтинговой системе оценивания результатов обучения [3–7]. Это связано с присоединением России к Болонской конвенции (2003). Отметим, что в Европе Болонский процесс направлен, прежде всего, на обеспечение открытости образовательного пространства и академической мобильности всех его участников, а благодаря балльно-рейтинговой системе результаты обучения студента формализуются и могут быть учтены при переходе из одного университета в другой. Здесь не ставится задача анализировать эту систему, оценка которой подвергается противоречивым мнениям. Отметим только, что некоторые авторы, подчеркивая, что «основной идеей обсуждаемой системы является накопление промежуточных оценок в течение семестра и учет их суммы при выставлении итоговой оценки», приходят к выводу, что более естественно называть эту систему накопительной [4]. Именно эта идея имела в виду при разработке вышеуказанной Методики. Эту идею приходилось внедрять одному из авторов данной статьи для оценивания качества подготовки студентов в Санкт-Петербургском государственном университете (читал лекции на факультете географии и геоэкологии в 2003–2016 гг.). Реализации этой идеи посвящены наши предложения по оцениванию результатов промежуточной аттестации по специальным дисциплинам кафедры фототопографии и фотограмметрии, и сводятся они к внедрению накопительной системы баллов (далее – Накопительная система баллов).

Сущность предложений по внедрению Накопительной системы баллов для оценивания результатов промежуточной аттестации сводится к следующему. При выставлении окончательной оценки промежуточной аттестации используется сумма баллов, полученных по трем составляющим контроля усвоения дисциплины: оценка усвоения теории в семестре – максимум 25 баллов (по оценкам на семинарских занятиях); оценка по практике в семестре – максимум 25 баллов (по оценкам за лабораторные и практические работы) и оценка на экзамене (зачете с оценкой) – 50 баллов.

Таким образом, максимальное количество баллов (накопленная сумма баллов), которое может набрать обучающийся, составляет 100 баллов. Эта сумма баллов конвертируется в оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно».

Количество баллов, набранных обучающимися в течение семестра по результатам текущего контроля, объявляется до экзамена. При этом в начале семестра курсанты знакомятся с оцениванием промежуточной аттестации и порядком начисления баллов за каждый рубежный контроль (сущность реализации Накопительной системы баллов, критерии оценивания и порядок начисления баллов за каждый рубежный контроль подробно описаны в Методике).

Применение Накопительной системы баллов покажем на примере оценивания промежуточной аттестации при изучении указанной выше учебной дисциплины «Фотограмметрия». Для изучения курса фотограмметрии отводится 18 зачетных единиц (648 часов). Распределение по основным видам занятий выглядит следующим образом: лекции – 128 часов, семина-

ры – 38 часов (9 семинаров), лабораторные занятия – 66 часов (4 лабораторные работы), практические занятия – 102 часа (5 практических работ и 4 занятия по решению задач) и 1 курсовая работа. Таким образом, по дисциплине предусмотрено 18 рубежных контролей (9 семинаров, 4 лабораторных и 5 практических работ). Последовательность изучения этой дисциплины с количественными показателями по видам занятий приведены в табл. 1.

Таблица 1

Трудоёмкость видов занятий по учебной дисциплине «Фотограмметрия»

Наименование видов занятий	6-й семестр	7-й семестр	8-й семестр	9-й семестр
	Трудоёмкость, час			
Занятия с преподавателем	98	120	104	88
Лекции	48	40	30	10
Семинары	12	12	8	6
Лабораторные работы	24	42	–	–
Практические работы	8	22	52	28
Групповые занятия	–	–	–	4
Курсовая работа	–	–	–	40
Зачет с оценкой	–	4	–	2 (кр)
Экзамен	6	–	6	–
Зачет с оценкой	–	4	–	–
Самостоятельная работа	60	53	74	51
Общая трудоёмкость, час/з. е.	158 /4,4	173 /4,8	178 /4,9	139 /3,9

По семестрам рубежные контроли распределяются так:

6-й семестр – 5 (3 семинара и 2 лабораторные работы);

7-й семестр – 6 (3 семинара, 2 лабораторные и 2 практические работы);

8-й семестр – 4 (2 семинара и 2 практические работы);

9-й семестр – 3 (2 семинара и 1 практическая работа).

Анализ данных табл. 1 позволяет сделать следующие выводы. Дисциплина изучается на протяжении 2 лет (4 семестра), результаты ее усвоения оцениваются проведением промежуточных аттестаций: 2 экзамена (6-й и 8-й семестры и зачет). В тоже время на протяжении изучения дисциплины текущая успеваемость оценивается 18 рубежными контролями, как по усвоению теории (38 часов семинаров), так и по приобретению умений и навыков (66 часов лабораторных и практических работ). Однако результаты рубежных контролей не оказывают явного влияния на оценки промежуточных аттестаций, т. е. на оценки экзаменов и зачета с оценкой (см. рис. 1).

Самый ответственный экзамен, оценка по которому идет в диплом, проводится в 8-м семестре, что диктуется логикой изучения дисциплины – именно в этом семестре изучается теория и отрабатываются практически самые важные технологии: создание цифровых моделей рельефа и цифровых ортофотопланов, которые являются основой для создания современных видов геопространственной информации (изучаются в других дисциплинах) [8]. В этом семестре проводится также 3 семинара (8 часов) и две практические работы, оценки за которые не влияют на оценивание промежуточной аттестации. Не менее важным для усвоения содержания дисциплины является и 6-й семестр, в котором изучаются теоретические основы, включающие в себя 3 семинарами и 2 лабораторные работы, оценки за которые также не влияют на оценивание промежуточной аттестации. Очевидно, что оценивание промежуточной аттестации только по результатам экзамена не очень способствует формированию твердых умений и навыков, которые потребуются выпускникам в войсках. Отсюда вытекает

необходимость совершенствования оценивания результатов промежуточной аттестации. Поэтому предложено изменить оценивание результатов промежуточной аттестации внедрением Накопительной системы баллов.

Сущность оценивания результатов промежуточной аттестации с применением накопительной системы баллов рассмотрим на примере 6-го семестра. В табл. 2 показаны данные, характеризующие сущность Накопительной системы баллов, а именно: название рубежных контролей и их веса, количество баллов, соответствующее полученной оценке за семинар или лабораторную работу, номера вопросов в экзаменационном билете, их веса и набранное количество баллов, также соответствующие полученной оценке. Веса семинаров и лабораторных работ устанавливаются в зависимости от значимости темы и трудоемкости. Веса вопросов экзамена зависят от их важности, при этом приоритет отдается практическому вопросу или задаче (вопрос № 3). Кроме того, здесь показана сумма баллов, соответствующая оценке того или иного рубежного контроля или вопроса экзамена, а также приведена накопленная сумма баллов и оценка промежуточной аттестации (последний столбец).

Таблица 2

Оценивание результатов промежуточной аттестации

Текущий контроль								Экзамен				Промежуточная аттестация	
Оценки	Семинары и их веса			Сумма баллов	Лабораторные работы и их веса		Сумма баллов	Вопросы и их веса			Сумма баллов	Накопленная сумма баллов	Оценка аттестации
	№ 1 1	№ 2 1,5	№ 4 1		№ 1 1	№ 2 1,5		№ 1 1,5	№ 2 1	№ 3 2,5			
5	7	11	7	25	10	15	25	15	10	25	50	100	5
4	5	8	5	18	8	12	20	12	8	20	41	79	4
3	3	5	3	11	6	9	15	9	6	15	31	57	3
2	2	4	2	8	4	6	10	6	4	10	23	41	2

Отметим, что экзамен по учебной дисциплине «Фотограмметрия» проводится письменно. Форма приема экзаменов указывается в рабочей программе учебной дисциплины. Для определения оценок по промежуточной аттестации накопленная сумма баллов конвертируется по нормативным значениям баллов, установленным в Методике, в оценки:

55 баллов и меньше – «неудовлетворительно»;

56–71 балл – «удовлетворительно»;

72–87 баллов – «хорошо»;

более 87 баллов – «отлично».

Таким образом, наши предложения по внедрению Накопительной системы баллов сводятся к учету результатов текущего контроля при оценивании результатов промежуточной аттестации. Очевидно, что преимущества Накопительной системы баллов оценивания результатов аттестации обусловлены связью и прямым влиянием результатов обучения на протяжении всего семестра (текущего контроля) на оценку промежуточной аттестации (рис. 2). Достоинствами ее является повышение мотивации систематической работы обучающихся при усвоении образовательной программы, повышение учебной дисциплины и снижение влияния случайных факторов на результаты промежуточной аттестации (экзамена или зачета с оценкой).

Применение суммарной (интегральной) оценки промежуточной аттестации в результате использования Накопительной системы баллов имеет ряд положительных моментов:

– позволяет стимулировать качественное выполнение всех заданий обучающимися по учебной дисциплине на протяжении всего курса ее изучения;



Рис. 2. Связь между текущим контролем успеваемости и промежуточной аттестацией при накопительной системе

- более объективно и адекватно оценить уровень усвоения курса дисциплины на данном отрезке времени ее изучения;
- интегральная оценка, состоящая из частных оценок, позволяет достигать большей дифференциации при оценке качества подготовки, значит, достигается более объективная общая оценка уровня подготовки (оценка 4 может быть при 72 и, например, при 85 баллах);
- письменный семестровый экзамен предоставляет курсантам тренироваться грамотно и четко формулировать свои мысли, что немаловажно для будущего офицера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Совершенствование оценивания результатов промежуточной аттестации, как одной из самых важных составляющих системы контроля результатов обучения, играет важную роль в повышении качества подготовки обучающихся. Традиционные способы приема семестровых экзаменов без учета результатов текущей успеваемости (рубежных контролей) не всегда позволяют обеспечить высокое качество подготовки выпускников.

Использование Накопительной системы баллов способствует созданию более эффективного контроля учебного процесса, следовательно, способствует повышению качества подготовки обучающихся. Эта система может использоваться при изучении других дисциплин. Однако это зависит от содержания учебной дисциплины, целей и задач ее усвоения. Поэтому внедрение Накопительной системы баллов требует внимательного и всестороннего обсуждения и принятия решения на заседании кафедры.

Список используемых источников

1. Об образовании в Российской Федерации: федеральный закон № 273-ФЗ от 29 декабря 2012 г. [дата подписания 29 декабря 2012 г.]. – URL: <https://base.garant.ru/77308190/> (дата обращения: 24.05.2021).
2. О мерах по реализации отдельных положений ст. 81 федерального закона № 273 от 29 декабря 2012 года «Об образовании в Российской Федерации»: приказ министра обороны Российской Федерации № 670 от 15 сентября 2014 года // Российская газета. – 2014. – № 6570 (298).

3. Хрущ Р. М. Проблемы подготовки военных топографов и пути их решения // Сборник докладов и выступлений на III военно-научной конференции «Пути повышения эффективности топогеодезического и навигационного обеспечения Вооруженных Сил Российской Федерации». – М., 2019. – С. 82–89.
4. Майков Е. В. Накопительная система оценки успеваемости студентов // Вестник Московского университета. Педагогическое образование. – 2008. – Сер. 20, № 2. – С. 3–18.
5. Бородич С. А., Тепляковская А. Н. Балльно-рейтинговая система оценки знаний студентов в вузе: проблемы и перспективы // Инновационные педагогические технологии: материалы IV Международной научной конференции. – Казань: Бук, 2016. – С. 139–141.
6. Меньк А. Р., Каляженков А. Н. Балльно-рейтинговая оценка военно-технических компетенций студентов факультета военного обучения // Вестник ЮУрГУ. Сер.: Образование. Педагогические науки. – 2016. – Т. 8, № 3. – С. 100–111.
7. Стариченко Б. Е. Балльно-рейтинговая система оценивания учебной деятельности студентов: вопросы моделирования // Педагогическое образование в России. – 2017. – № 6. – С. 205–206.
8. Хрущ Р. М. Фотопланы (ортофотопланы): сущность, содержание и развитие методов, способов и средств трансформирования снимков // Научные технологии в космических исследованиях Земли. – 2018. – Т. 10, № 3. – С. 94–102.

Г. Н. Мальцев,
доктор технических наук, профессор

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ КОМАНДНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ РАДИОУПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ ОТ ПОЛЕТА ПЕРВЫХ ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ ЗЕМЛИ ДО СЕГОДНЯШНИХ ДНЕЙ

Представлена история развития радиотехнических средств управления космическими аппаратами Наземного автоматизированного комплекса управления от первых командных радиолиний до современных командно-измерительных систем. Систематизированы этапы развития командно-измерительных систем и особенности их технической реализации на каждом этапе. Рассмотрены современные и перспективные технологии радиоуправления космическими аппаратами, в том числе технологии управления малыми космическими аппаратами перспективных многоспутниковых космических систем.

Ключевые слова: управление космическими аппаратами, командные радиолинии, командно-измерительные системы, технологии радиоуправления космическими аппаратами.

ВВЕДЕНИЕ

Полеты космических аппаратов (КА), их нормальное функционирование на орбите и применение для решения любых задач обеспечиваются радиоуправлением КА с Земли. Для обеспечения полетов КА в 1956 г. в рамках подготовки к запуску первого искусственного спутника Земли (ИСЗ) был создан Наземный автоматизированный комплекс управления (НАКУ) [1, 2]. Созданная в СССР территориально-распределенная сеть командно-измерительных пунктов НАКУ позволяла вести управление КА на всех витках, проходящих над территорией страны. В последующем НАКУ и входящие в его состав средства прошли несколько этапов развития. Они обеспечивали полеты первых ИСЗ, космического корабля «Восток-1», пилотируемого Ю. А. Гагариным, последующие полеты пилотируемых и автоматических КА. На сегодняшний день при общей тенденции повышения уровня автономности КА средствам НАКУ принадлежит определяющая роль при решении задач управления КА в интересах их применения по назначению.

Задачи управления КА средствами НАКУ решаются в форме выполнения сеансов управления КА. Сеанс управления КА – это согласованные по целям, задачам, месту и времени действия, осуществляемые в ходе подготовки и выполнения наземными радиотехническими средствами управления КА операций информационного обмена между КА и пунктом (центром) управления. Радиотехническими средствами управления КА в составе НАКУ являются командно-измерительные системы (КИС). Это совмещенные (многофункциональные) радиотехнические системы, наиболее важная из решаемых ими функциональных задач – передача на КА сигналов управления. КИС являются в настоящее время основным типом радиотехнических средств НАКУ. Современные КИС ведут свою историю от использовавшихся при управлении первыми ИСЗ командных радиолиний (КРЛ). Одновременно с развитием радиотехнических систем управления КА происходило развитие технологий радиоуправления КА, характеризующихся формой и методами передачи на КА управляющих воздействий, системными и техническими решениями радиотехнических систем управления КА, организацией их информационного взаимодействия с КА и с Центром управления полетом. В настоящей статье представлен исторический очерк развития КРЛ и КИС и технологий радиоуправления КА от полета первых ИСЗ до сегодняшних дней.

ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ КОМАНДНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НАЗЕМНОГО АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ

Управление КА принято рассматривать в широком и узком смысле слова. Управление КА в широком смысле слова – весь комплекс мероприятий, связанных с организацией управления КА. Управление КА в узком смысле слова – непосредственная передача на КА управляющих воздействий.

Целью управления КА является обеспечение решения целевой задачи КА в соответствии с его предназначением и программой полета. В общем случае управление КА осуществляется наземными и бортовыми средствами управления и экипажем (для пилотируемых КА), между которыми рационально распределяются функции управления КА [3]. Передача управляющих воздействий на КА по радиоканалу средствами наземного комплекса управления сеансы управления КА представляют собой управление КА в узком смысле слова.

Общая характеристика этапов развития радиотехнических средств управления КА представлена в табл. 1.

Таблица 1

Этапы развития радиотехнических средств управления КА

Этап	Средства управления КА	Исполнение	Особенности радиотехнических средств управления КА
1	КРЛ	Мобильное	Разработаны на основе систем радиуправления самолетами и ракетами; реализуют командное и командно-программное управление; средства автоматизации не используются
2	КИС I поколения	Стационарное	Специально разработаны для управления КА; реализуют командно-программное управление; используются внешние средства автоматизации
3	КИС II поколения	Стационарное	Специально разработаны для управления КА; реализуют командно-программное управление; используются встроенные средства автоматизации типа больших ЭВМ
4	КИС III поколения	Стационарное, мобильное	Специально разработаны для управления КА в результате глубокой модернизации КИС II поколения; реализуют командно-программное управление и управление через полетное задание, а также режим управления КА с ретрансляцией; используются встроенные средства автоматизации типа локальной сети ПЭВМ

Радиуправление КА в форме передачи с Земли по радиоканалу управляющих воздействий началось с запуска третьего ИСЗ 15 мая 1958 г. Для первых двух ИСЗ, имевших достаточно простую конструкцию, радиуправление не предусматривалось. При работе с ними средства НАКУ осуществляли только контроль траектории полета и прием передаваемых ими с орбиты сигналов. Первым наземным средством радиуправления КА, которое использовалось для управления первыми КА, начиная с третьего ИСЗ, стала КРЛ, разработанная на основе серийной командной радиолинии управления и подрыва самолетов-мишеней [2]. Аппаратура КРЛ размещалась на автомобиле и обеспечивала передачу на КА 20 разовых команд, исполняемых непосредственно после их приема. Тем самым в форме передачи разовых команд был реализован метод командного управления КА.

Для радиоуправления космическим кораблем «Восток-1» 12 апреля 1961 г. использовалась та же КРЛ, модернизированная для управления пилотируемыми КА. При модернизации КРЛ для обеспечения пилотируемых полетов число передаваемых разовых команд было увеличено до 40, в их число входили в том числе 2 разовых команды высокой надежности (особо важные разовые команды) «Спуск» и «Спасение» для запуска циклограммы спуска КА с орбиты и катапультирования космонавтов при посадке. В дальнейшем методом командного управления осуществлялось управление всеми пилотируемыми КА типа «Восток» и «Восход», используемые при этом КРЛ обеспечивали передачу на КА до 400 разовых команд, в том числе 5 особо важных разовых команд.

КРЛ, разработанные на основе систем радиоуправления самолетами и ракетами, являются первым этапом развития наземных радиотехнических средств управления КА. Они были основными средствами радиоуправления различными типами КА на начальном этапе развития НАКУ и активно использовались до конца 60-х гг., постепенно уступая место КИС. Поскольку командный метод имеет существенные ограничения, связанные с исполнением разовых команд непосредственно после их приема, начал развиваться командно-программный метод управления КА с передачей на КА по радиоканалу разовых команд и программ управления. Программа управления представляет собой совокупность управляющих воздействий с привязкой к моментам их исполнения (во временных программах – к времени исполнения, в координатных программах – к координатам КА). Показательно, что последняя по срокам разработки КРЛ, реализующая командное управление КА, обеспечивала передачу на КА до 4000 разовых команд, а в первой командно-программной радиолинии (КПРЛ) их требовалось только 400 за счет возможности передачи на КА программ управления. Это позволяло успешно управлять различными типами автоматических КА серии «Космос». Радиотехнические средства управления КА последующих поколений разрабатывались уже в стационарном исполнении.

Вторым этапом развития наземных радиотехнических средств управления КА стали КИС I поколения. Они создавались как многофункциональные (совмещенные) радиотехнические системы для выполнения комплекса задач управления КА, сохраняя при этом преемственность по режимам передачи командно-программной информации с первыми КРЛ и КПРЛ. КИС I поколения были разработаны в начале 60-х гг. и эксплуатировались с учетом модернизации до конца 80-х гг. При их создании сложился типовой перечень функциональных задач КИС: передача на КА командно-программной информации, измерение текущих навигационных параметров КА, прием с КА телеметрической информации, сверка и коррекция бортовой шкалы времени. Использовалось стационарное размещение КИС в специальных технических зданиях. Опыт разработки и применения КИС I поколения был использован при создании КИС последующих поколений с преемственностью технических решений и режимов работы. Так, при управлении первыми навигационными КА был отработан режим передачи эфемеридной информации, используемый с тех пор во всех КИС управления навигационными КА.

КИС I поколения не были автоматизированы, однако уже в 70-е гг. ставилась задача автоматизации проведения сеансов управления КА за счет использования внешних средств автоматизации, но тогда эта задача не была решена. Она была решена при создании последующих поколений КИС за счет использования встроенных средств автоматизации.

Третьим этапом развития наземных радиотехнических средств управления КА стали КИС II поколения. Они были разработаны в конце 70-х гг. и эксплуатировались с учетом модернизации до конца 90-х гг. Особенностями КИС II поколения является то, что каждая КИС предназначалась для управления несколькими типами КА, близкими по назначению. В состав КИС предусматривалось включение нескольких приемно-передающих систем для одновременного проведения нескольких сеансов управления КА и в состав аппаратуры КИС начали включаться встроенные средства автоматизации – большие ЭВМ [4, 5]. Благодаря этому в КИС II поколения был обеспечен переход к автоматизированному управлению КА, в

период их использования сложились основы современной технологии автоматизированного управления КА средствами НАКУ. Была создана КИС для управления пилотируемыми КА типа «Союз», ставшая базовой для последующих модификаций КИС управления пилотируемыми КА и орбитальными станциями.

Четвертым этапом развития наземных радиотехнических средств управления КА стали КИС III поколения. Они являются результатом развития и глубокой модернизации КИС II поколения, основой реализации современных и перспективных технологий радиоуправления КА. Они были разработаны в начале 90-х гг. и эксплуатируются с учетом модернизации до настоящего времени. Особенности КИС III поколения является комплексная автоматизация проведения сеансов управления КА на основе локальной сети ПЭВМ, встроенных в КИС, разработка КИС в стационарном и мобильном исполнении наземной аппаратуры. В КИС III поколения был осуществлен переход на современную радиоэлектронную элементную базу и реализованы перспективные технологии радиоуправления КА, в том числе управление КА через полетное задание и управление с ретрансляцией через геостационарные спутники-ретрансляторы [5, 6]. Эти КИС являются основой создания КИС нового поколения.

Одновременно развиваются КИС дальнего космоса, предназначенные для управления межпланетными и научно-исследовательскими КА, запускаемыми для исследования планет Солнечной системы и космического пространства. Их можно считать самостоятельным классом радиотехнических средств космических комплексов. Они представляют собой создаваемые в единичных экземплярах уникальные радиотехнические системы с дальностью действия до миллионов километров. КИС дальнего космоса начали создаваться с начала 60-х гг. и в течение развития НАКУ прошли несколько этапов модернизации, сохраняя преемственность по режимам работы [2, 7]. Следует отметить создание крупнейшей в мире КИС дальнего космоса с зеркальной антенной диаметром 70 м.

Современной тенденцией развития средств управления КА является их унификация и создание унифицированных средств НАКУ, в том числе КИС. Создание унифицированного ряда аппаратуры КИС предполагает разработку базовых вариантов наземной и бортовой аппаратуры КИС, реализацию в радиоканалах информационного обмена с КА унифицированных технологий передачи информации и унификацию элементной базы. При этом унификация КИС рассматривается в контексте унификации всех средств НАКУ, включая переход на унифицированную структуру командно-измерительных пунктов. В разрабатываемых унифицированных КИС предусматриваются модификации для управления низкоорбитальными и высокоорбитальными КА при прохождении КА в зоне радиовидимости КИС и для управления КА с ретрансляцией через спутники-ретрансляторы.

СОВРЕМЕННЫЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ РАДИОУПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ

Вместе с развитием радиотехнических средств управления КА происходило развитие технологий радиоуправления КА [2, 8]. Традиционной технологией радиоуправления КА, сложившейся в НАКУ и реализованной в нескольких поколениях КИС, является командно-программное управление с проведением сеансов управления при прохождении КА в зонах радиовидимости командно-измерительных пунктов и с предварительной записью в КИС командно-программной информации для ее последующей передачи на КА.

В качестве основных направлений развития перспективных технологий радиоуправления КА отметим следующие: управление КА через полетное задание, транзитный режим передачи информации на КА из Центра управления полетом, управление КА с ретрансляцией, информационный обмен с КА сообщениями унифицированных форматов.

Следует отметить, что значительный импульс развитию перспективных технологий радиоуправления КА был дан при создании наземного комплекса управления многоорбитальной

транспортной космической системы «Энергия-Буран», и некоторые из этих технологий впервые в отечественной космонавтике были успешно реализованы средствами НАКУ во время орбитального полета КА «Буран» 15 ноября 1988 г. [9].

Общая характеристика перспективных технологий радиуправления КА представлена в табл. 2.

Таблица 2

Перспективные технологии радиуправления КА

Технология радиуправления КА	Особенности технологии радиуправления КА
Управление КА через полетное задание	Реализуется при передаче на КА информации межмашинного обмена между наземным и бортовым комплексами управления. Используется по мере необходимости обновления полетного задания в течение полета КА, основным методом управления КА остается командно-программное управление
Транзитный режим передачи информации на КА из Центра управления полетом	Реализуется при передаче командно-программной информации и информации межмашинного обмена на КА из Центра управления полетом в реальном масштабе времени через систему связи и передачи данных НАКУ и КИС. При проведении сеанса управления КИС работает в режиме ретранслятора (шлюза), поддерживая радиоканал связи с КА
Управление КА с ретрансляцией	Реализуется при информационном обмене КИС с КА через спутник-ретранслятор командно-ретрансляционной системы. Обеспечивает глобальность и оперативность управления КА
Информационный обмен с КА сообщениями унифицированных форматов	Реализуется при информационном обмене КИС с КА в форме единого цифрового потока или сеансных массивов информации. Единый цифровой поток передается из Центра управления полетом в транзитном режиме передачи информации на КА через КИС

Управление через полетное задание осуществляется в форме передачи на КА информации межмашинного обмена – массивов цифровых кодов программного обеспечения бортового комплекса управления. Управление через полетное задание возможно только для КА с развитыми бортовыми комплексами управления, допускающими перепрограммирование или обновление программного обеспечения в ходе полета КА. При этом управление через полетное задание может осуществляться несколько раз в течение всего полета, а в каждом сеансе управления может происходить командно-программное управление КА.

При транзитной передаче информации из Центра управления полетом на КА через КИС осуществляется передача сигналов управления КА в реальном масштабе времени, без предварительной записи в КИС. Для реализации транзитного режима передачи информации на КА должна обеспечиваться возможность информационного обмена Центра управления полетом с КА и между Центром управления полетом и КИС должен поддерживаться выделенный широкополосный канал связи [8].

Для управления КА с ретрансляцией необходимо развертывание космических командно-ретрансляционных систем на основе высокоорбитальных или низкоорбитальных спутников-ретрансляторов. При этом повышаются глобальность и оперативность управления КА и может быть осуществлен переход от многопунктной к малопунктной структуре наземных комплексов управления. Если в многопунктном наземном автоматизированном комплексе управления при проведении сеансов управления низкоорбитальными КА при их прохождении в зонах радиовидимости командно-измерительных пунктов обеспечивается коэффици-

ент глобальности связи, равный 0,1–0,15, то в малопунктном наземном комплексе управления при управлении низкоорбитальными КА с ретрансляцией обеспечивается коэффициент глобальности связи, равный 0,4 при одном геостационарном спутнике-ретрансляторе и 1 при трех геостационарных спутниках-ретрансляторах. Для реализации управления и информационного обмена с КА с ретрансляцией в 2011–2014 гг. развернута отечественная Многоцелевая космическая система ретрансляции на основе геостационарных спутников-ретрансляторов типа «Луч-5» [10].

Единый цифровой поток представляет собой поток нескольких видов информации, передаваемых с временным разделением каналов. В режиме единого цифрового потока осуществляется обмен всеми видами информации между Центром управления полетом и бортовым комплексом управления КА, при этом данный режим объединяет технологии транзитной передачи информации на КА из Центра управления полетом, управления КА с ретрансляцией и управления КА через полетное задание. Кроме того, в данном режиме упрощается структура совмещенного сигнала КИС [5].

Новой мировой тенденцией развития космических средств является развертывание многоспутниковых космических систем малых КА массой до нескольких сотен килограмм с числом КА в космической системе до сотен и тысяч. В нашей стране с 2020 г. началась реализация федеральной целевой программы «Сфера». К 2030 г. на орбиту планируется запустить более 600 КА, в том числе до 300 серийно выпускаемых малых КА перспективных низкоорбитальных многоспутниковых космических систем. Управление такими многоспутниковыми орбитальными системами требует разработки принципиально новых технологий и нового поколения наземных радиотехнических средств управления КА.

К числу особенностей перспективных многоспутниковых космических систем малых КА относятся:

- специализация малых КА и высокий уровень автономности их функционирования;
- избыточность орбитальной группировки КА и изменение во времени степени активности функционирования каждого КА;
- применение малых КА каждого самостоятельно или в составе орбитальных кластеров.

Сложившиеся организация и консервативная технология управления КА существующих космических систем средствами наземных комплексов управления, формируемых из состава средств НАКУ, не рассчитаны на управление орбитальными группировками, включающими до нескольких сотен КА. Такой состав орбитальных группировок КА будет превышать пропускную способность НАКУ, которая ограничивается объективными факторами, что приводит к необходимости изменения организации управления малыми КА перспективных многоспутниковых космических систем.

Особенности управления малыми КА перспективных многоспутниковых космических систем приводят к необходимости реализации новых технологий радиоуправления, таких как сетевое и групповое управление КА, управление «виртуальными» КА, образованными кластерами малых КА. Ранее такие технологии радиоуправления КА не использовались, при этом управление малыми КА перспективных многоспутниковых космических систем будет носить ситуационный характер и осуществляться в соответствии с гибкими технологическими циклами управления. Для управления малыми КА перспективных многоспутниковых космических систем необходима разработка нового поколения КИС, реализующих данные технологии и предназначенных для массового управления малыми КА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные КИС являются основным классом радиотехнических средств НАКУ и ключевым элементом наземных комплексов управления КА. Они прошли сложный путь развития и совершенствования, и история их развития неразрывно связана с историей развития

НАКУ. Вместе с развитием радиотехнических средств управления КА происходило развитие технологий радиоуправления КА – от простейшего командного управления до командно-программного управления и управления через полетное задание. Используемые в настоящее время в НАКУ КИС III поколения являются основой реализации современных и перспективных технологий радиоуправления КА.

В качестве наиболее важных направлений развития наземных радиотехнических средств управления КА на современном этапе следует отметить унификацию КИС и разработку нового поколения радиотехнических средств управления КА для массового управления малыми КА перспективных многоспутниковых космических систем.

Список используемых источников

1. *Покровский Б. А.* Космос начинается на Земле. – М.: Патриот, 1996. – 494 с.
2. История Командно-измерительного комплекса управления космическими аппаратами от истоков до Главного испытательного центра имени Г. С. Титова. / Н. П. Колесников [и др.]. – М.: Изд-во ЗАО СП «Контакт-РЛ», 2006. – Кн.1: Общий очерк. – 480 с.
3. *Соловьев В. А., Лысенко Л. Н., Любинский В. Е.* Управление космическими полетами: в 2 ч. – М.: Изд-во МГТУ. – Ч. 1. – 2009. – 476 с.; ч. 2. – 2010. – 426 с.
4. *Галантерник Ю. М., Гориш А. В., Калинин А. Ф.* Командно-измерительные системы и наземные комплексы управления космическими аппаратами. – М.: МГУЛ, 2003. – 200 с.
5. *Молотов Е. П.* Наземные радиотехнические системы управления космическими аппаратами. – М.: Физматлит, 2004. – 256 с.
6. Современные технологии навигации геостационарных спутников / Ю. М. Урличич [и др.]. – М.: Физматлит, 2006. – 280 с.
7. Радиосистемы межпланетных космических аппаратов / Р. В. Бакитько [и др.]. – М.: Радио и связь, 1993. – 328 с.
8. *Кравец В. Г.* Автоматизированные системы управления космическими полетами. – М.: Машиностроение, 1995. – 256 с.
9. Многоцветный орбитальный корабль «Буран» / Ю. П. Семенов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1995. – 448 с.
10. Космические системы ретрансляции / Н. А. Тестоедов [и др.]. – М.: Радиотехника, 2017. – 448 с.

В. П. Огородников,
доктор философских наук, профессор

СИСТЕМА ДЕТЕРМИНАЦИЙ НАУЧНОГО ПОИСКА

В статье рассматриваются основные причины и непринципные детерминанты процесса научного поиска истины. При этом анализируется проблема соотношения необходимости и случайности в научном поиске, демонстрируется связь между целью и результатом в нахождении истины, раскрывается эвристическая роль философской методологии в этом процессе.

Ключевые слова: причина и следствие, причинные и непринципные детерминанты научного процесса, необходимость и случайность научного открытия, детерминизм, истина, явление, сущность, количество, качество, мера.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема детерминации научного процесса становится актуальной с момента первых научных исследований. Уже древнегреческий философ Сократ задавался вопросом об источнике знания сущности, считая, что сам он никакой мудростью не обладает «я знаю, что я ничего не знаю», а все, что он произносит – говорит его устами, временно пребывающий в его теле некий «демон». Легенды рассказывают, как Архимед открыл свой знаменитый закон, принимая ванну, а Ньютон – в результате падения яблока на голову. В Новое время философы разделились по вопросу об источнике истинных знаний на два существующих и поныне лагеря. Представители эмпиризма (родоначальник Ф. Бэкон) полагали, что источником знаний человека является его опыт, обобщаемый индуктивным путем. Противоположный лагерь – рационалисты (родоначальник Р. Декарт) до сих пор утверждают, что истину человек постигает интуитивно, открывая находящиеся в голове «врожденные идеи» или соприкасаясь с неким внешним «ментальным миром», существование которого, наряду с материальным миром, постулируется во многих эзотерических «концепциях». Рационализм абсолютизирует дедуктивный метод познания, используя который люди должны сопоставить знание сущности («врожденные идеи», идеи «ментального мира») с непосредственно отражаемыми органами чувств предметами. Это и дает возможность определить общее (сущность) в единичном (явлении). С противоположностью эмпиризма и рационализма связана и проблема детерминации научного открытия. Представители позитивистской концепции познания, тяготея к эмпиризму, не признают закономерность научного процесса и потому постулируют его случайность.

Так, К. Поппер (1902–1994) в работе «Логика научного открытия» (1952) утверждает, что всякое научное открытие происходит чисто случайно. Аргументы при этом выдвигаются следующие:

- 1) все, что необходимо – предсказуемо;
- 2) научное открытие невозможно предсказать, ибо для этого надо будет указать, ЧТО именно будет открыто, а это создает парадокс «открытия до открытия».

Следовательно, научное открытие – чисто случайный акт [11].

Основываясь на этом положении, Поппер пытается доказать, что вся история человечества – конгломерат случайных событий, в ней нет ничего закономерного. Этот тезис логик Поппер аргументирует при помощи следующего силлогизма:

- 1) всякий шаг по пути прогресса человечество делает благодаря открытию чего-то нового в природных процессах, что революционизирует технику и материальное производство;
- 2) открытие нового (как «доказано» выше) – чисто случайный акт.

Следовательно, всякое историческое событие – чистая случайность [12].

Поэтому, заключает Поппер, будущее человечества определяется исключительно прогрессом в познании мира, а не какими-либо объективными законами [11]. Следовательно, история как цепь причинно-следственных связей не существует. Отсюда вывод Поппера об отсутствии закономерности в историческом процессе, об его «открытости». Всякий, кто пытается навязать истории закономерность, направленность – враг открытого, «свободного» общества, враг демократии. Поппер прямо указывает на этих «врагов»: Платон, Гегель и, в особенности, Маркс [2].

Однако оба силлогизма Поппера ложны потому, что включают в качестве посылок ложные суждения. В первом силлогизме большая посылка «Все, что необходимо – предсказуемо» неправомерно отождествляет объективную необходимость и субъективную предсказуемость. Но наличие необходимой причинной связи не является достаточным условием для субъективной предсказуемости чего-либо. Предсказание имеет два основания: объективное – наличие необходимой причинной связи между явлением «а» и явлением «б», и – субъективное – знание о существовании этой причинной связи. Поэтому ни какая объективная необходимость последовательности наступления явления «б» за явлением «а» при отсутствии знания об этой необходимости не может служить основанием для предсказания наступления явления «б» при обнаружении явления «а». Не зря Демокрит говорил, что предпочитает знание одной только цепи необходимой причинно-следственной связи персидскому престолу.

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Абсолютизация случайности, недетерминированности научного познания негативно сказывается на сам процесс роста научного знания – теряется не только единство научного познания, но и связь, и преемственность в развитии каждой науки. Так, видный представитель философии науки XX века, постпозитивист Т. Кун (1922–1996) предлагает рассматривать науку как деятельность множества различных научных сообществ. Каждое сообщество (даже если они представляют одну науку) автономно и характеризуется не только специфическим стилем мышления и ценностными установками, но и собственными критериями научности и рациональности (которые Кун отождествлял с критериями истинности). Все это рациональное методологическое ядро Кун называет распространенным ныне термином «парадигма». Множество научных сообществ порождает множество парадигм, и, следовательно, плюрализм критериев научности и истинности. Последнее – подрыв оснований всей науки. Отсутствие единого критерия истинности дает возможность признать истинными любые высказывания – научные, антинаучные, откровенно мистические, шизофренические... Иррациональность такого подхода подтверждает и сам Кун, заявляя в своей работе «Структура научных революций», что в период научной революции конфликт разных парадигм означает конфликт различных взглядов на один и тот же предмет исследования. При этом смена парадигм происходит интуитивно, а не рационально. В статье, являющейся приложением к работе, Кун утверждает, что заключение, к которому должен прийти открыватель новой парадигмы, не может быть продиктовано только логическими критериями [6]. Поэтому психологические мотивы часто являются не только важными, но и определяющими. Такой подход не оставляет место закономерности в научном исследовании. Кун постоянно признается в своей солидарности в этом вопросе К. Попперу [6]. Индетерминизм, смыкающийся с идеей плюрализма истины, уничтожает сам процесс научного поиска, ведет к отождествлению научного и обыденного познания, уравнивает науку, паранауку и антинауку.

Рассмотрение антидиалектических концепций детерминизма приводит к выводу, что только диалектико-материалистическая концепция детерминизма может предложить алгоритмы для решения проблемы связи необходимости и случайности в детерминации научного открытия. Тому, как она «работает» посвящена данная статья.

В соответствии со сказанным выше, дадим краткий обзор диалектико-материалистической концепции детерминизма, разработанной и опубликованной в виде отдельной монографии автором данной статьи [8]. Авторская детерминистическая концепция связана с развенчанием и преодолением трех ложных альтернатив, являющихся серьезным препятствием для развития современной методологии научного познания: лапласовского детерминизма – индетерминизма; необходимости – свободы, абсолютного монизма – плюрализма.

Любой вариант выбора внутри этих дилемм ведет к антидиалектическим концепциям в философии, естествознании, обществознании и технической науке – теологии, телеологии, неовитализма, механицизма, релятивизма, «теории факторов», фатализма, волюнтаризма и т. п.

Суть предлагаемой автором диалектико-материалистической концепции детерминизма в теоретической реконструкции системы типов детерминаций, определяющих развитие любой системы как реализацию ее возможностей, воплощение ее в действительность, что требует, прежде всего, определения качественных различий типов и форм детерминации. Типы детерминации относятся к связи взаимодействия разных систем, формы детерминации – к связи состояния различных этапов, моментов развития одной и той же системы.

Системным центром в структуре детерминаций является причина – то, что порождает тот или иной процесс. Однако абсолютизация причины и причинно-следственного отношения как единственного типа детерминации привела еще Демокрита [2], а через два тысячелетия после него Лапласа [7] к абсолютизации необходимости и третированию случайности как следствию незнания причин. Такая позиция является фундаментом фатализма и всех, по существу, теологических концепций. Критерием различения причины и целой системы непричинных детерминаций любого процесса развития является анализ системы взаимодействий, в которой выделяются относительно активные стороны (детерминанты). Такой анализ позволяет выявить структуру каузальных, кондициональных, функциональных, инспирирующих, системных и управляющих типов детерминаций.

Применение данной структуры к анализу любого процесса, в том числе и к процессу научного открытия, позволяет установить конкретную форму проявления диалектического единства устойчивого и изменчивого, сущностного и явленческого, необходимого и случайного, повторяющегося и неповторимого, общего и единичного в изучаемом процессе, избежать метафизических (антидиалектических) противопоставлений и абсолютизаций.

Связь необходимого и случайного с античных времен является проблемой. До сих пор многие авторы пытаются противопоставить необходимость и случайность, представляя их то разными способами реализации возможности [7, 57], то утверждая, что случайность как-то взаимодействует с необходимостью, являясь следствием внешних причин [5]. Нередко встречается и вариант, предложенный О. Курно (1801–1877), который характеризовал случайность как результат пересечения независимых причинных рядов, а необходимость как результат пересечения связанных (до момента пересечения) причинных рядов [10].

Именно подобные противопоставления необходимости и случайности являются основанием абсолютизации одной из этой пары противоположности, как это сделал К. Поппер, абсолютизовав случайность научного открытия.

В чем же состоит действительное единство необходимости и случайности? Подходы к решению вопроса определены Г. Гегелем. Он (вторым, после Аристотеля) дал определение случайности как формы бытия необходимости [4].

Автор данной статьи считает, что связь необходимости как сущности и случайности как явления (формы бытия сущности) лучше всего раскрывается в диалектическом законе единства количественных и качественных изменений. Это единство наиболее отчетливо представлено Гегелем в категории «мера». Закон единства количественных и качественных изменений предполагает, что любое качество может количественно изменяться в пределах (минимум и максимум) определенной меры – это эволюция. Прерыв постепенных количественных изменений меры – это «скачок» через границу меры в новое качество – революция.

Однако Гегель полагал, что прерыв постепенных изменений может дать не новое, а иное качество. Так, повышение температуры окружающего воздуха выше или ниже определенного значения приводит к гибели и растительного и животного миров. Такой результат нельзя назвать «революцией». Это переход в иное качество – деградация. Конкретные показатели температуры воздуха, изменяющиеся в благоприятных для дальнейшей эволюции пределах, могут быть охарактеризованы как случайности-проявления необходимой меры *условий* эволюции (кондициональная детерминация). В то время как конкретный показатель высоты какого-либо растения, также колеблющийся в рамках определенной меры, будет представлять случайность-проявление действия *причины* (каузальная детерминация).

Раскрытие неразрывной связи необходимого и случайного требует привлечения диалектической концепции детерминизма, абрис которой был представлен выше. Заметим, что все сказанное относится, прежде всего, к объективным процессам и лишь во вторую очередь – к нашим взглядам на них.

Эти соображения позволяют произвести конструктивную критику позиции К. Поппера по отношению к научному открытию.

ПРОБЛЕМА И ПУТИ ЕЕ РЕШЕНИЯ

В качестве отправной точки нашего исследования используем мысли по поводу методов научного познания, необходимости и случайности в этом процессе видного философа и методолога науки XX века К. Поппера.

К. Поппер понимал диалектику (как и вообще все, что относится к любому принципу) лишь как метод мышления, логический прием. Он не признавал никакой объективной диалектики как закономерностей и принципов развития объективной реальности, а не сознания. Отсюда противоречие для Поппера – отношение между противоположными суждениями, а не борьба противоположностей в объективном развитии [9]. Таким образом, Поппер сводит законы мира к законам логики, законам познания.

Поэтому Поппер не принимает марксистскую концепцию исторического материализма, называя ее «историцизмом» и отказывает общественному бытию в закономерности развития. Именно случайность всякого шага истории и делает, по мнению Поппера, человечество свободным. Будущее не определяется кокой-либо необходимостью, а зависит от человека, от прогресса в познании мира [14]. История общества по Попперу не имеет смысла, потому что не закономерна. Поппер – последовательный и убежденный сторонник индетерминизма и потому критикует своих бывших соратников по «Венскому кружку» за использование индуктивного метода. Индукция ведет, по его мнению, к логическим ошибкам, указанным еще Юмом, а также к априоризму, так как индукция никогда не может охватить весь массив исследуемого процесса [11].

Важным основанием исторического индетерминизма Поппера является его эвристический индетерминизм. С точки зрения Поппера главный принцип детерминизма – принцип причинности – означает только то, что любое событие можно предсказать [11]. Ну а так как предсказание исторических событий будущего невозможно, утверждает философ, то в области истории никакие научные предвидения не состоятельны [13]. В этом Поппер делает зависимой от субъективного акта предсказания объективную причинную связь. Однако, далеко не все, что связано причинно-следственной, объективно-закономерной связью, можно предсказать. Субъективным основанием предсказания всегда является знание этого объективного закона. Поэтому, невозможность предсказать будущее состояние какой-либо системы не есть критерий ни отсутствия, ни присутствия закономерности в связи взаимодействий этой системы. Поппер явно отождествляет субъективный акт познания закономерности и объективное существование этой закономерности.

Физики, биологи, химики, социологи и другие ученые не могут предсказать те законы, которые они же, быть может, обнаружат в дальнейшей своей исследовательской деятельности. Однако это не свидетельствует о том, что объективных законов вообще не существует.

Только в абсолютно необходимом мире П. Лапласа открытие некоторой причинной связи определяет возможность абсолютного предсказания того, как эта причинная цепь будет разворачиваться в самом отдаленном будущем. Ибо детерминизм Лапласа – панкаузализм, в котором нет места непричинным детерминантам процесса развития, а, следовательно, случайностям.

Использование диалектической концепции детерминизма не дает возможностей однозначного предсказания будущих состояний. Это объективно определено вероятностным характером объективных законов, а субъективно – неполнотой знания этих законов, отсутствием абсолютной истины.

Поппер, вступая в противоречие с самим собой, с одной стороны, не признает возможности предсказать будущие фазы исторического развития общества, а с другой – утверждает, что развитие общества определяется научным познанием. Но познавать можно лишь закономерное. Если последующее состояние любой системы никак не определяет последующее состояние, то закономерности нет. В таком случае нет и связи состояний. Следовательно, последующее состояние не есть собственно «последующее» по отношению к «предшествующему», поэтому можно утверждать, что мы имеем дело с совершенно другой системой, а не результатом эволюции исходной. К примеру, если я сегодняшней ни в чем не повторяю себя вчерашнего, то это уже «не я». При отсутствии объективной закономерной связи состояний чего-то это что-то нельзя познать, ибо познаются лишь устойчивые, воспроизводящиеся, т. е. закономерные связи.

Так как развитие – это система направленных закономерных изменений, то признавая, что делает Поппер, развитие научного познания приходится признать и направленность этого развития. Последнее служит объективным основанием для прогноза в отношении будущих этапов развития науки, что отрицает индетерминист Поппер.

Впрочем, отрицать законы физики Поппер не решается. Поэтому он пытается постулировать принципиальное различие между физическими, биологическими и социальными процессами:

«В мире, который описывает физика, ничего по-настоящему нового не происходит. Даже в новой машине мы всегда можем увидеть перекомбинацию старых частей. Новизна в физике – это просто иные расположения и перекомбинации. Напротив, социальная новизна, как и биологическая новизна, является новизной подлинной» [13]. «Подлинная новизна» по Попперу – абсолютная новизна, не признающая никакой связи настоящего и прошлого состояний. Попперу, видимо, была не известна ни общность происхождения, ни общность и связность эволюции всего живого на Земле. Современную синтетическую теорию эволюции он отвергает и вместе с ней общность строения ДНК и РНК живой материи. Общность «технологии производства» живых видов сегодня уже хорошо раскрыта. Здесь старое включается составной частью в новые структуры.

Но и в физических процессах не наблюдается нигде абсолютных повторений. В неживой природе мы наблюдаем закономерности эволюционного процесса, в котором постепенное количественное накопление приводит к революции – образованию качественно нового состояния. При этом также происходит диалектическое отрицание старого, включающегося в новое состояние как момент сохранения, преемственности, закономерности.

Видя в социальных процессах только череду «революций», порождающих абсолютно новое состояние системы, без удержания положительного из старого, Поппер превращает историю в конгломерат случайностей. Каждое историческое событие случайно потому, что, как утверждает Поппер, его нельзя предсказать. Критику такой «аргументации» мы уже привели выше.

Предметом научного познания может быть по Попперу только нечто принципиально новое. Философ связывает принципиально новое в социальных процессах с единичным событием. В соответствии с позитивистской традицией он утверждает, что исследователь общества может выяснить только конкретную причинно-следственную связь для данного единичного события. При этом никакой ученый не может сформулировать общие законы, ибо каждое событие уникально, случайно [12]. Выше уже указывалось, что в объективном процессе повторяемость, закономерность всегда соединяются с неповторимостью, относительной уникальностью, как необходимость и случайность. Эта диалектика должна быть отражена и в процессе познания развития природы и общества, между которыми нельзя ставить непроходимых барьеров, как это делает Поппер. С другой стороны, весь послевоенный период своей деятельности ученый предпринимал мощные попытки развенчать индукцию как основу научного познания. В этом Поппер, с одной стороны, противостоит традиционному номинализму и эмпиризму позитивизма, а с другой – считает отдельное научное открытие атомарным («сингулярным») случайным актом. Здесь присутствует явное противоречие – если «атомарные» открытия нельзя индуктивно обобщить, то нет возможности создания теории. Философ не допускает возможность перехода от истинности сингулярных высказываний к истинности общей теории [11]. Поппер утверждает, что для характеристики отдельного открытия может использоваться только дедукция, а индукция в процессе открытия вообще не существует [11]. С его точки зрения каждый ученый идет от взятых неизвестно откуда общих теоретических положений, которые позволяют дедуктивно объяснить суть единичного открытия. Это очень напоминает классический рационализм Декарта, опиравшегося на теорию «врожденных идей» [3]. Отсюда вытекает и знаменитый метод «фальсификации», предлагающий найти эмпирические условия, в которых данная теория демонстрирует свою неистинность и, тем самым, подтверждает свою научность. Тем самым производится попытка некоего механического соединения теоретического и эмпирического.

Однако Поппер считает, что истинность теории может быть обоснована лишь логически. Тем самым он отождествляет истинность и правильность построения теории – логичность. Российский логик В. А. Светлов убедительно показал несостоятельность критики Поппером теории индукции Карнапа, и доказал, что высокая степень эмпирической поддержки теории совместима с высокой степенью ее информативности [15].

Произведенная Поппером демаркация индуктивного и дедуктивного путей познания, делает невозможным осознание неразрывной связи случайности и необходимости в научном познании и в научном открытии. Постулируемое Поппером «абсолютно случайное» открытие не может претендовать на истину. Прогресс в научном познании по Попперу есть процессы конкуренции научных теорий по принципу близости не к истине, а к «правдоподобию». Поппер пытается найти внеэмпирические критерии прогрессивности и правдоподобности научных теорий, но ничего кроме указанного метода фальсификации не находит.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Критический анализ основных положений концепции научного познания К. Поппера показал, что в эпистемологии, как в любой другой сфере человеческой деятельности, следует основываться на диалектической концепции детерминизма, рассматривающей неразрывную связь необходимости и случайности. В противном случае возникает стремление исследователя абсолютизировать либо необходимость, либо случайность объективной реальности и процесса ее познания. Это ведет в тупик научное исследование и не позволяет определить критерий истинности положений науки.

Овладение истиной в процессе познания связано с адекватным отражением законов и закономерностей в развитии объективной и субъективной реальности. Незаконмерное не существует и не познаваемо. Всякий закон представляет собой относительную необходимость,

осуществляющуюся в рамках конкретной меры, как единства количественных и качественных характеристик развивающихся систем. Каждый элемент множества количественных характеристик, существующих как мера, представляет собой случайную форму бытия относительной необходимости. Поэтому задачей научного познания является процесс индуктивного обобщения множества эмпирических фактов. Результатом такого восхождения от единичного к общему является гипотеза. Гипотеза, как предположение о возможном закономерном (необходимом) характере эмпирически полученных фактов, проверяется путем дедуктивного нисхождения от общего к единичному, данному в эмпирических фактах. Так происходит проверка гипотезы на истинность в процессе научно-экспериментальной практики. Многократное эмпирическое подтверждение гипотезы в варьируемых условиях возводит ее в разряд теории.

При этом следует отличать различные типы детерминации системы (каузальную, кондичиональную, функциональную и т. п.), представляющие активную сторону взаимодействия различных систем. В свою очередь типы детерминации нужно отличать от форм детерминирующего процесса – связи состояний различных этапов, моментов развития одного и того же. Формы не детерминируют процесс. Так, например, время и пространство, являясь не субстанциями, а формами бытия субстанции, сами по себе ничего не детерминируют. Поэтому нельзя говорить о прямой детерминации настоящего прошлым, потраченного времени пройденным расстоянием. Подобные заявления возвращают нас к субстанциальной концепции времени и пространства и противоречат теории относительности А. Эйнштейна.

В этом контексте не бывает абсолютно случайных, «атомарных» научных открытий. Каждое открытие обязательно является открытием закона, т. е. раскрытием необходимого в случайном. Открытие «вписывается» в систему открытий данной области научного познания и в данную эпоху его развития. Кроме того, открытие является обобщением множества эмпирических исследований и испытаний. Когда количество подобных экспериментов подходит к определенной границе меры, происходит прерыв постепенного эволюционного процесса в развитии научного познания. Эволюция сменяется революцией – открытием нового качества мира. При этом не следует абсолютизировать роль творческой интуиции. «Интуитивный прорыв» также не случаен. По этому поводу существует масса мифов о «случайном озарении», постигшем того или иного ученого.

Рассмотрим, к примеру, один из таких мифов. Многие биографы Д. И. Менделеева поведают о том, что выдающийся ученый открыл периодический закон химических элементов во сне... Однако никому другому такой закон во сне не явился (скажем, дворнику Д. И. Менделеева – Василию). Совершенно ясно, что все подобные «интуитивные прорывы» совершаются людьми не только одаренными, но и отдавшими изучению определенной проблемы многие годы своей жизни. Пример с открытием периодического закона многократно раскрывает диалектическую связь случайности и необходимости в научном познании. Во-первых, закон явился обобщением большого числа эмпирических фактов об определенной связи химических свойств различных элементов и их атомного веса. Количественное накопление казавшихся случайными фактов привело к новому качеству – открытию закона. Во-вторых, сам закон установил в сознании ученых тот порядок в развитии химических элементов, который был им присущ объективно. Открытие этого закона позволило предсказать свойства еще не открытых элементов и определило, тем самым, пути научных исследований в этой области. Последнее обстоятельство – лучшая критика концепции К. Поппера, ожесточенно боровшегося с идеей самой возможности подобных предсказаний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итог произведенному анализу, можно определить следующие основные моменты детерминации научного открытия, разделив их на объективные и субъективные.

К объективным детерминантам научного открытия, в первую очередь, относится противоречие между природой и обществом, разрешающееся и вновь возникающее в процессе трудовой деятельности, производящей материальные и духовные блага. Противоречия внутри общества также являются объективным детерминантом развития научного познания. Противоречия определяют и стимулируют поиск, открытие новых фактов, без чего невозможна целесообразная деятельность человека.

И материальное, и духовное производство как целенаправленный процесс детерминируются целью – идеальным образом потребного будущего. Цель включает в себя способы и методы ее осуществления. Поэтому открытие объективных законов развития природы и общества является важнейшим субъективным основанием целесообразной деятельности.

Объективная стохастичность природных и общественных процессов определяет необходимость рассмотрения процесса научного открытия как вероятностно детерминированного. Такой подход выявляет несостоятельность интерпретаций процесса научного познания и как абсолютно необходимого, жестко детерминированного, и как к абсолютно случайного, недетерминированного. Рассмотрение системы причинных и не причинных детерминант научного открытия позволяет понять, что каждое конкретное научное открытие является случайностью – формой проявления относительной необходимости научного познания. Относительная необходимость представлена движением научного познания от одного открытия к другому, что выявляет объективную связь различных этапов развития науки, единство эволюции и революции в познании.

Список используемых источников

1. Гегель Г. Наука логики: в 4 т. – М.: Изд-во соц.- эк. лит., 1937. – Т. 5. – 451 с.
2. Демокрит Антология мировой философии. – М.: Мысль, 1969. – Т. 1, ч. 1. – 329 с.
3. Декарт Р. Рассуждение о методе: в 2 т. – М.: Мысль, 1989. – Т. 1. – 345 с.
4. Ивлев В. Ю., Баграмянц М. Л., Селютин А. В. Методологическая роль категорий случайности, необходимости и возможности в научном познании // Известия МГТУ «МАМИ». – 2008. – № 1/5. – С. 198–301.
5. Ильин В. В., Машенцев А. В. Философия в схемах и комментариях. – СПб.: Питер, 2005. – 157 с.
6. Кун Т. Логика открытия или психология исследования? // Философия науки. – 1997. – Вып. 3: Проблемы анализа знания. – С. 28–67.
7. Лаплас П.- С. Опыт философии теории вероятностей. – М.: Librokom, 2011. – 208 с.
8. Огородников В. П. Познание необходимости: детерминизм как принцип научного мировоззрения. – М.: Мысль, 1985. – 308 с.
9. Поппер К. Предположение и опровержение. Рост научного знания. – М.: Ермак, 2004. – 451 с.
10. Cournot A. Exposition of the Theory of Chances and Probabilities. – Berlin, 2013. – 216 p.
11. Popper K. The open universe: An argument for indeterminism. – New York: Totowa Salem J., 1996. – 367 p.
12. Popper K. Poverty of Historicism. – London: Routledge, 1957. – 347 p.
13. Popper K. The Open Society and his Enemies: in 3 vol. – London: Routledge, 1995. – Vol. I. – 361 p.
14. Popper K. The Logic of Scientific Discovery. – London: Routledge, 2005. – 513 p.
15. Светлов В. А. История научного метода. – М.: Академический проект, 2008. – 700 с.

Н. А. Репях,
кандидат философских наук, доцент;
А. Н. Хрустова

МИРОВОЗЗРЕНЧЕСКАЯ ПАРАДИГМА Н. А. УМОВА В РУССКОМ КОСМИЗМЕ

В статье рассматриваются космофилософские воззрения выдающегося отечественного физика Н. А. Умова, постановка и решение ученым проблем эволюции Вселенной, жизни, места человека в мире, его свободы и познавательных возможностей, зарождения и обострения глобальных проблем.

Ключевые слова: космос, Вселенная, эволюция, жизнь, принцип всеобщей связи, стройность, познание, глобальные проблемы.

Современные процессы дифференциации науки обусловлены детерминантами онтологического, гносеологического, методологического и социального характера и носят закономерный характер. Однако их последствия носят противоречивый и разнонаправленный характер. Сформировавшаяся на основе множества отраслей научного знания техносфера противопоставлена природе и по своей сути уже стала губительной для окружающего мира. И самым уязвимым в наш век, получивший много названий (космический, кибернетический, информационный, турбулентный и т. д.), оказался человек. Все чаще сегодня можно услышать призывы к очеловечиванию самого человека и необходимости обращения к гуманитарному знанию. Такая мировоззренческая позиция объединяет подавляющее большинство представителей самых различных научных областей, теорий, дисциплин. При этом подобную ситуацию, по сути дела кризисную для судеб всего человечества, ее глубинные причины, возможные последствия и основные способы решения в значительной степени предвосхитили многие мыслители прошлого. Среди них особое место занимает наш соотечественник, великий физик и философ, русский космист, создатель физико-механической модели живой материи Николай Алексеевич Умов [3].

Профессор Н. А. Умов поражал современников своими энциклопедическими знаниями, далеко выходящими за пределы физики. Это вопросы из области астрономии, метеорологии, химии, биологии и, конечно же, философии. Не зря многие коллеги и ученики по праву называли Умова физиком-философом. А ему самому принадлежит знаменитый призыв к своим студентам – «Физику поистине приличествует звание философа».

Родился Николай Алексеевич 4 февраля 1846 года в г. Симбирске, в семье военного врача. Успешно окончив московскую гимназию, Умов поступил на математическое отделение физико-математического факультета Московского университета. Поступлению в практический технологический Университет (г. Санкт-Петербург) предшествовала работа на вагоностроительном заводе. После двух месяцев обучения вольнослушателем в технологическом Университете Умов был оставлен при Московском университете для подготовки к профессорскому званию.

Н. А. Умова в 1871 году избрали доцентом Новороссийского университета (г. Одесса), там же ученый получает экстраординатуру и ординатуру. В этот период жизни он защищает магистерскую диссертацию, а в 1874 году докторскую – «Уравнения движения энергии в телах». Сама диссертация вызвала дискуссию и резкую критику со стороны официальных оппонентов – профессоров А. Г. Столетова и Ф. А. Слудского. Диспут продолжался 6 часов.

Теоретическую физику Умов изучал самостоятельно. Видимо самообразование во много определило оригинальность суждений и идей Николая Алексеевича. Так, он впервые ввел в науку такие основополагающие понятия, как скорость и направление движения энергии,

плотность энергии в данной точке среды, пространственная локализация потока энергии. Вектор плотности потока энергии носит имя Умова (вектор Умова – Пойнтинга).

В 1893 году Н. А. Умов перешел в Московский университет, где в 1896 году возглавил кафедру физики.

Свое жизненное кредо Николай Алексеевич определял следующим образом: обычно люди только живут, при этом высшая культура состоит в том, что они оправдывают свою жизнь, а не только живут.

Служению науке и преподаванию Умов посвятил больше 40 лет своей жизни. Николай Алексеевич всегда оставался всеобщим любимцем университетского сообщества, особенно велик его авторитет был в студенческой среде. Когда начались студенческие волнения по поводу реакционной политики министра просвещения, в знак солидарности со своими учениками профессор Умов демонстративно уходит из университета.

О лекторском мастерстве Умова ходили легенды. Как известно, он преподавал физику и математикам, и медикам, и агрономам. И всегда аудитория, где проходили занятия Умова, будь то по теоретической либо экспериментальной физике, была переполнена. При этом слушателями были не только студенты физико-математического факультета, но и других, включая гуманитарные. Особенно яркими, образными по содержанию и форме представления отличались вводные и заключительные лекции. Это всегда было вдохновенным обращением к мировоззренческим, нравственным, смысложизненным проблемам глобального характера.

Выступая активным популяризатором науки, Умов активно участвовал в организации и непосредственно деятельности различных научных обществ. Среди них Общество изучения и распространения физических наук, Общество любителей естествознания, антропологии и этнографии, Московское общество любителей природы, Московское педагогическое общество и др. При этом ученым написано большое количество научно-популярных статей, очень часто он выступал с публичными лекциями. Удивительным образом в лекциях Умова сочетались популяризация научных знаний и фундаментальная наука, введение в научную проблематику и тончайшая детализация.

Обращаясь к онтологическим проблемам, Умов, прежде всего, утверждает принцип всеобщей взаимосвязи. Ссылка на высказывание Лапласа о связи между многообразием всех явлений окружающего мира выступает отправной точкой его суждения о том, что такие связи присутствуют не только в мире физических явлений. Умов убежден, что они, несомненно, распространяются и на духовную жизнь. При этом духовная связь существует как между современниками, так и всеми предшествующими поколениями людей, живших на Земле. И это, считает ученый, налагает особую ответственность на людей за результаты своей деятельности перед грядущими поколениями. Причем не только за осязаемые плоды деятельности, но и скрытые зародыши будущего. Мы должны, пишет Умов, обладая каким-нибудь источником силы, «точно установить и утвердить направление ее действия». Основу мировоззренческой позиции людей, убежден ученый, должно составлять не только эмоционально-чувственное отношение к окружающему миру. Примеров такого отношения, подчеркивает он, достаточно много в человеческой истории и представителей такого подхода ученый называет «внеаучными мыслителями». Умов убежден в необходимости переориентирования человеческой деятельности на основе научного подхода, как в познании, так и преобразовании окружающего мира [1].

Смысл эволюции представлен Умовым в концепции антиэнтропийной сущности жизни. В свои изыскания ученый вводит понятие стройности, которое, по его мнению, является фундаментальным свойством материи. Стройность у Умова детерминирует не только формы движения, их разнообразие, упорядоченность и связность, но и гармонизирует саму материю. Она концентрирует рассеянную в пространстве энергию, которая в природных циклах стремится к дезинтеграции, затуханию. В конечном итоге, стройность обеспечивает зарождение жизни и эволюцию всего живого. И сущность жизни, по Умову, в преобразовании нестрой-

ных, хаотичных движений в стройные, в повышении «качества стройностей в природе», что сообщает развитию векторный, восходящий характер.

Он пишет, что стройный механизм стремится к созданию обстановки, находящейся с ним в резонансе. Другими словами, стройность обеспечивает в окружающем мире гармонию в соответствии со свойственным ему чувством красоты. В свою очередь эволюция живой материи детерминирует «количество стройностей» и их качественное состояние. И уже человек осознанно распространяет стройности в растительном и животном мире, тем самым предотвращая проявления в нем случайностей.

И именно стройность, по мнению Умова, окруженная беспорядочными случайностями, обеспечивает многообразие предметов и явлений в окружающем мире, их существование, в том числе человека и человеческую жизнь. При этом большая стройность обеспечивает более стройные формы любого движения, их «связность» и большее разнообразие. Умов отмечает, что чем глубже стройность проникает в механизм, чем она совершеннее, соответственно возникает больше поводов к ее борьбе с «нестройностями», например, миганием пламени, перебоем звуков. Стройный механизм приводит все окружающее, убежден ученый, в гармонию.

Таким образом, считает Умов, в преобразовании хаотичных движений в стройные, повышении «качества стройностей» и придании изменениям восходящего, векторного характера и заключается смысл эволюции вообще, в том числе и смысл жизни.

Ученый считает, что существование стройности невозможно без своеобразного регулятора. У высших животных регулярные функции выполняет нервная система, а вот для жизни человека и всей духовной сферы регулятором является красота. Она выступает детерминантой поведения, защищает существование высших типов всего живого. Умов поясняет механизм регуляции следующим образом. Нарушение красоты, считает он, выступает сигналом грозящей опасности. А это вынуждает человека не предпринимать каких-либо действий по нарушению стройности (или красоты).

Чувство красоты, уверен Умов, присуще всему живому, однако степень его развитости неодинакова. Представлено это чувство и в органах чувств человека. Однако, являясь регулятором жизни, оно может порождать миражи. И если в повседневной жизни миражи вполне могут предохранять человеческую жизнь от разного рода опасностей, то возможный для человеческого познания субъективизм может привести к различного рода ошибкам.

Показания органов чувств, их синтез порой наделяются человеком сверхъестественными силами, выводятся за пределы человеческого существования и могут стать, как пишет Умов, «объектами религиозного экстаза».

Излишнее изобилие ощущений, пишет Н.А. Умов, может быть пагубно. Прекращать известное рода ощущения позволяют органы, которыми наделен человек. Однако наиболее достоверными в получении информации об окружающем мире выступают искусственные меры защиты – результаты показаний инструментов научного познания.

Поскольку уже упомянутые миражи есть не что иное, как субъективные образы мира природы, человек преклоняется своим чувствам. По мнению Умова любовь человека к природе на самом деле есть любовь к самому себе, к показаниям своих органов чувств. Избавиться от субъективизма, к которому ведет обыденное познание, позволяет познание научное.

Признание принципа всеобщей взаимосвязи, генетической связи поколений прошлого, настоящего и будущего приводит Умова к рассмотрению ряда гносеологических вопросов. С позиций гносеологического оптимизма он решает важную гносеологическую проблему возможностей и границ познания. «Для чудес науки, – пишет он, – нет пределов ни в пространстве, ни во времени, нет избранных и отверженных».

Познание мира живущими во всем многообразии связей, отношений и взаимозависимостей – долг и перед ушедшими, и перед грядущими поколениями. В этом по Умову и заключена важная задача науки. Каждое поколение сталкивается с новыми вызовами, призвано решать возникающие перед ним проблемы в познании окружающего мира и таким образом

преодолевать границы непознанного. В подтверждение своих мыслей Умов обращается к мнению видного представителя древнегреческой философии, стоика Сенеки, утверждавшего бесконечность и прогресс человеческого знания.

В познании окружающего мира, по мнению Умова, особое место занимает творческое предвидение. Оно выступает венцом естествознания, обладая мощнейшим потенциалом решения задач и познания, и преобразования действительности. Предвидение позволяет человечеству, создающему вторую природу, осознавать последствия своей преобразовательной деятельности. «Мы должны, – пишет Умов, – прежде, чем воспользоваться источником силы, точно установить и утвердить направление ее действия». Он называет это «сообщением векториальных свойств» источнику силы, чтобы использовать его в своих интересах. Такую деятельность Умов называет правильной.

Онтология Умова неразрывно связана с этикой. Особенностью так называемой «космотехнической» философии Умова является признание детерминированности любой практической деятельности нравственными нормами. Этот своеобразный категорический императив философ сформулировал следующим образом: «Не делать зла ни в коей мере, делать возможно больше добра».

Само возникновение нравственного чувства по Умову напрямую связано с процессом упорядоченности живого вещества, его эволюции, а в дальнейшем – совершенствования и усложнения психики. Отмечая и в этом особую роль стройности, Умов считает, что грех и зло проявляют себя как ее нарушения, своеобразное отклонение от эволюционной прямой. И только совесть в состоянии обеспечить сохранение стройности, она выступает источником и средством эволюции.

По убеждению Умова, вся духовная жизнь общества всецело находится под управлением логоса, так называемого учения «слова жизни». В содержательном плане в логосе Умова объединяются два понятия – научное знание и любовь. При этом любовь у него представлена не в контексте особых отношений между мужчиной и женщиной или просто их привязанности друг к другу, а на основе дружбы, а то и Любви к Человеку. Собственно это есть выражение своеобразной симпатии, особых отношений к Личности. То есть, Умов здесь интерпретирует понятие любовь, прежде всего, как отношение «к человеку как к человеку».

Своеобразно представляет ученый роль вышеназванного логоса в жизни человека. Саму жизнь он сравнивает с часами, в которых падающая гиря выступает двигателем жизни, а логос выступает маятником, сочетающим научное знание и любовь. И если нисходящее движение маятника означает любовь в жизни человечества, то научное знание по Умову удерживает человечество от хаотических процессов.

С глубоким сожалением ученый чаще всего отмечает, что «наши часы идут плохо», а регулятор жизни (маятник) не соответствует своему назначению и в полной мере собственно логосом так и не стал. Ну а если считать, полагает Умов, что человечество и доросло до осознания необходимости надежного регулятора жизни, то на самом деле это «дешевенький маятник», сделанный на скорую руку.

В отличие от К. Э. Циолковского, утверждавшего, что жизнь кишит в космосе, Умов считал жизнь на нашей планете уникальным явлением и при этом единственным.

Каково же место Человека и живого во Вселенной? – вопрошает Умов. «Капля материи и океан пустоты» – заявляет он. Умов считает, что сама материя в значительной степени представляет маловероятное событие во Вселенной, не говоря уже о космосе в целом. Земля занимает всего лишь 1/300 долю массы планетной системы и еще менее вероятной во Вселенной выступает жизнь.

В масштабах космоса жизнь, а тем более жизнь отдельного индивида, делает вывод ученый, не только имеет малую вероятность, но и является песчинкой в океане пустоты. Она и есть по Умову «пасынок Вселенной».

Отсюда, делает он вывод, жизнь является еще более маловероятной, нежели материя. И поскольку маловероятному всегда угрожают серьезные опасности, его следует хранить и

беречь. В этом заключается, по его мнению, одна из главных задач естествознания. Само же возникновение живого Умов объясняет с позиций антропоморфизма [4].

Оригинально решает Умов проблему свободы человека. Он пишет, что выполнение различных механических движений приводит человека к иллюзорному выводу о собственной свободе. В правильности такого вывода человека якобы убеждает его личный обыденный опыт, в котором отсутствуют препятствия телодвижениям либо существование выбора той или иной модели поведения.

Саму человеческую жизнь Умов образно называет «неизвестным помещением», в котором человек осознает свою беспомощность. Личный опыт и собственное миропонимание не позволяют человеку понять окружающий его мир во всем многообразии процессов, предметов и явлений. А вот признание сложности и противоречивости этого мира и является одним из важнейших достижений естествознания. Человек, пишет Умов, как рыба в неводе окутан своеобразной сетью зависимости. При этом сеть эта тянется как в глубины прошлого, так и в далекое будущее. Незнание человеком строения такой «сети» ведет к серьезным ошибкам, которые могут существенно сказаться не только для поколений живущих, но и поколений будущих.

Актуальным для людей XXI века является обращение Умова к проблемам, которые уже тогда начали приобретать статус глобальных.

Прогресс в развитии человеческой цивилизации в конце концов ведет к разрушению и тупику. Забываются существенные вещи, пишет Умов, что наша планета имеет в целом ограниченную поверхность, и она не обладает беспредельным и неизменно сохраняемым запасом энергии. Сложилась полная дисгармония между растущими человеческими потребностями и возможностями природы для их удовлетворения. Ученый заключает, что эволюция земной природы идет под уклон, в то время как эволюция человеческой расы следует к подъему [1].

Указанное противоречие, отмечает Умов, существовало всегда, но существенно обострилось в рассматриваемый период.

Человечество, по мнению Умова, прежде всего, столкнется с сырьевой проблемой – «голод железа, нефти, угля». С ограниченностью продовольственных ресурсов и необходимостью поиска новых связана демографическая проблема. Требуют к себе внимания и учащающиеся экологические кризисы. Каковы по Умову пути решения глобальных проблем? Мы будем свидетелями грандиозных последствий своей деятельности. Ученый подвергает критической оценке и призыв некоторых «предзнаменований» к пассивному отношению к окружающему миру, ведущему вплоть до отказа от деятельности вообще.

Отказ от научно-технического прогресса, следование призывам «к упрощению жизни» будет означать, считает ученый, возврат человечества в первобытное состояние. Это возврат, заключает он, в состояние древнего человека.

Прежде всего, Умов связывает решение глобальных проблем с преодолением дисгармонии человеческой природы. Раскрыть ее и найти средства к их устранению – задача науки.

Человек несовершенен, пишет ученый, его эволюция длится миллионы лет и она продолжается до настоящего времени. Поэтому мы не должны игнорировать как продолжительность этого процесса, так и «звериную генеалогию» человека, предками которого были представители «животного царства». Символично Умов представляет современного человека как бойца в изодранной одежде с кровоподтеками по всему телу, что явно указывает на страшные испытания и сражения с буйствующей толпой, из которой вырывается, спасая собственную жизнь. Этот образ, в свою очередь, выступает еще одним свидетельством несовершенства человека. Н. А. Умов называет это моральными и материальными «недомоганиями».

Сохранить нашу планету и нашу цивилизацию, научиться рационально использовать ресурсы и не тратить их на всякого рода конфликты – первостепенная задача всех земель. В этом заключается, убежден Умов, смысл человеческого существования, «логос нашей

жизни». И называет «величественную задачу человеческого гения: охранение, утверждение жизни на Земле».

Физик, философ, представитель русского космизма Николай Алексеевич Умов был новатором, многие идеи мыслителя определили время. Уникальность его как ученого, прежде всего в том, что вместе с развитием известных физических теорий и разработкой совершенно новых научных изысканий и экспериментов, его ищущая, невероятно чуткая мысль формировала цельное и оригинальное мировоззрение, обновленный взгляд на эволюцию природы, космоса и место в нем человека.

Список используемых источников

1. *Гиренок Ф. И.* Экология. Цивилизация. Ноосфера. – М.: Наука, 1987. – 180 с.
2. *Гуло Д. А.* Николай Алексеевич Умов. – М.: Наука, 1977. – 320 с.
3. *Кужекин Н. С., Репях Н. А., Хрустова А. Н.* Идеи русского космизма в сочинениях А. В. Сухова-Кобылина // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 668. – С. 407–411.
4. *Рыгина О. О.* Концепция эволюции природы и человеческого общества Н. А. Умова // Русский космизм и современность. – М., 1990. – С. 145–154.
5. *Панкова Э. В.* Философско-мировоззренческая концепция Н. А. Умова. – Орел: Возрождение, 2001. – 147 с.

Н. А. Башляев*;
В. Л. Гузенко**,
кандидат технических наук, профессор;
В. Л. Дорохов**,
доктор военных наук, доцент;
А. В. Федоров**

*1-й Государственный испытательный космодром МО РФ,
Архангельская обл., г. Мирный.

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

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОБОСНОВАНИЮ ПОКАЗАТЕЛЕЙ И КРИТЕРИЯ ОЦЕНИВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОХРАНЫ И ОБОРОНЫ КОСМОДРОМА

В статье предложен подход к обоснованию показателей и критерия оценивания эффективности решения задач охраны и обороны (ОО) космодрома, выполняемых на основе комплексного применения сил и средств непосредственной и территориальной обороны в системе ОО критически важных объектов (КВО) космодрома, характеризующих реализуемые возможности системы в целом и ее подсистем в отдельности. Рассмотрены возможные методики оценивания эффективности способов действий сил и средств охраны и обороны объектов космодрома.

Ключевые слова: эффективность, показатели эффективности, критерии эффективности, методика оценивания, вероятность.

ВВЕДЕНИЕ

Существующие угрозы функционированию космодрома со стороны незаконных вооруженных формирований (НВФ) и диверсионно-разведывательных формирований (ДРФ) противника определили необходимость совершенствования форм и способов боевого применения сил и средств ОО космодрома в периоды наивысшей активности противника в мирное и военное время. Наиболее перспективным направлением совершенствования является переход от пассивных действий системы ОО – «реагирование на факты нарушения в границах запретной зоны объектов» к активным действиям по уничтожению или нейтрализации противника на подступах к границам запретных зон объектов. В основу такого подхода положено комплексное применение сил и средств непосредственной и территориальной обороны в системе ОО КВО космодрома.

Предлагаемый подход в рамках требований боевого устава Воздушно-космических сил реализует условия применения сил ОО в форме общевойскового боя. Существующие подходы не реализуют этого требования, и результат их действий сводится к оцениванию ряда боестолкновений с применением стрелкового вооружения обеих сторон по правилам дуэльного боя. Такой подход не дает полной характеристики реализации боевых возможностей сторон. Предлагаемый подход реализует основные составляющие общевойскового боя – огонь, удар, маневр. Вместе с тем, его особенностями являются отсутствие линии соприкосновения сторон, разобщенность направлений действий, использование наземного и воздушного пространства, активное противодействие СВН противника, многовариантность способов действий и ряд других. Из выше сказанного следует заключить, что существующий научно-методический аппарат оценивания боевых возможностей сил ОО объектов космических войск необходимо адаптировать к особенностям ОО на основе изменения способов действий сил ОО космодрома.

Таким образом, настоящая работа посвящена совершенствованию научно-методического подхода к решению задачи оценивания комплексного применения сил и средств непосредственной, территориальной и противовоздушной обороны в системе ОО КВО космодрома.

СОДЕРЖАНИЕ ОСНОВНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ ПОДХОДА К ОБОСНОВАНИЮ ПОКАЗАТЕЛЕЙ И КРИТЕРИЯ ОЦЕНИВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОХРАНЫ И ОБОРОНЫ КОСМОДРОМА

Под эффективностью действий войск [1, 2] принято понимать степень достижения ими намеченной цели (выполнения поставленной боевой задачи). При этом эффективность можно рассматривать как ожидаемую – по планируемым боевым действиям, так и реально достигнутую – по завершенным боевым действиям.

Эффективность любой системы является мерой ее целесообразности, соответствия своему назначению, способности решать возложенные на нее задачи. Эффективность ОО космодрома от нападения ДРФ НВФ противника есть свойство, характеризующее способность сил и средств ОО и взаимодействующих с ними сил выполнять функции по отражению нападения противника и защиты КВО космодрома.

Боевая система ОО космодрома в одно и то же время выполняет различные функции и должна быть приспособлена к специфике реализации каждой из них, отвечая определенному набору разнородных требований. Следовательно, для ее общей характеристики необходима система показателей эффективности.

Полагая, что отдельно взятые показатели удовлетворяют требованиям, достаточно полно обоснованным в [1, 3, 4], к их системе целесообразно предъявить основные комплексные требования (рис. 1).



Рис. 1. Требования к системе показателей эффективности

Система показателей эффективности должна давать характеристику (достоверную и всестороннюю) системы с полнотой, соответствующей целям исследования, должна обеспечить сравнение различных систем и способов их действий, выявление их достоинств, недостатков и целенаправленный поиск путей их совершенствования.

В настоящее время для оценивания эффективности боевых систем используется большое количество разнородных показателей. В основу многочисленных систем классификации положен признак общности показателей. Общие показатели должны характеризовать вклад системы ОО космодрома в эффективность функционирования вышестоящей системы (системы космодрома, как объекта КВ). Частные – процессы, протекающие в системе ОО космодрома. В свою очередь, частные показатели предложено подразделять на локальные, которые выражают результаты выполнения определенной функции или совокупности функций каким-либо элементом, и системные, которые характеризуют результаты выполнения определенной функции системой в целом.

В данной классификации предусмотрены различия в физической природе частных показателей и разнообразие функций боевой системы, ими характеризующихся. Кроме того, требуется детализация общих показателей ввиду различий в их физическом смысле. Указанные причины определили необходимость расширения рассматриваемой классификации (рис. 2).

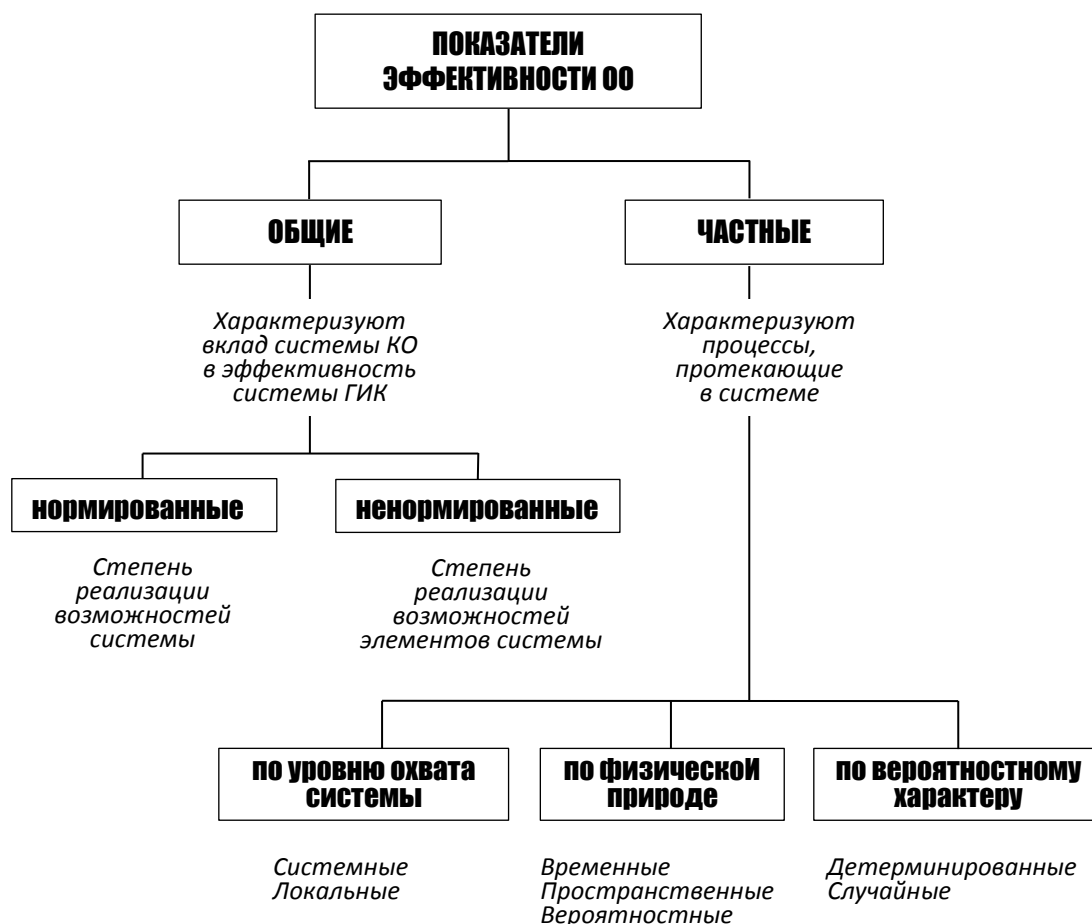


Рис. 2. Предлагаемая классификация показателей эффективности ОО космодрома

Как видно из рисунка, среди общих показателей целесообразно выделить ненормированные, которые выражают возможные результаты действий при заданном уровне эффективности реализации своих возможностей отдельных элементов системы ОО, и нормированные, которые показывают степень реализации возможностей системы при рассматриваемых способах действий.

Примерами ненормированных показателей могут служить: доля сохранившихся сил и средств ОО объекта космодрома – $m(Y)$; доля сохранившихся сил и средств НВФ и ДРФ противника – $n(Y)$; глубина продвижения НВФ и ДРФ противника – $\Gamma(Y)$; время выполнения задачи наступающей (активной) стороной – $t_{\text{зад}}(Y)$; расход боеприпасов – $N_p(Y)$; вероятность

поражения НВФ и ДРФ противника – $P_{\Pi}(Y)$; вероятность сохранения (z) КВО ГИК – $P_{COXzi}(Y)$.

Ненормированные показатели целесообразно использовать для сравнения различных вариантов действий элементов (i) боевой системы космодрома: если при прочих равных условиях $P_{COXzi}(Y_1) < P_{COXzi}(Y_2)$, то вариант Y_2 лучше Y_1 . Прирост эффективности боевых действий за счет перехода от первого варианта ко второму ($\Delta P_{COXzi}(Y_2 - Y_1)$) может быть вычислен по формуле

$$\Delta P_{COXz}(Y_2 - Y_1) = \frac{P_{COXzi}(Y_2) - P_{COXzi}(Y_1)}{P_{COXzi}(Y_1)}. \quad (1)$$

Нормированные показатели определяются как отношение результатов боевых действий при заданном способе боевых действий к некоторому эталону:

$$P_{COXz} = \frac{P_{COXzi}(Y)}{P_{COXzopt}}. \quad (2)$$

В качестве такого эталона, например, могут использоваться показатели, выражающие потенциальные возможности боевой системы в рассматриваемых условиях ($P_{COXzopt}$).

Преимуществом нормированных показателей является единый уровень отсчета для различных способов действий, что обеспечивает простоту и наглядность их сравнения. В формуле этот показатель напрямую связан с целью действий. Как видно из рис. 2, многообразие частных показателей эффективности диктует необходимость их классификации не только в соответствии с уровнем охвата системы (системные и локальные), но и по другим – физической природе, вероятностному характеру.

По физической природе показатели могут быть временными (например – время выполнения боевой задачи ($t_{зад}$), время маневра ($t_{м}$)), пространственными (например – глубина проникновения противника в границы запретной зоны объекта ($\Gamma_{п}$), удерживаемое пространство (периметр запретной зоны объекта), глубина и фронт маневра силами и средствами ОО, взаимные удаления боевых подсистем и др.), вероятностными (например – вероятность обнаружения НВФ и ДРФ противника ($P_{о}$), вероятность его поражения ($P_{п}$), вероятность выполнения задачи системой), они же могут выражать характеристики и результаты функционирования боевой системы ОО (например – вероятность сохранения КВО космодрома (P_{coxz})).

Предлагаемая классификация показателей эффективности позволяет более конкретно определить роль и место каждого из них в общей системе показателей, избранной для решения конкретной задачи, и создает основу для формулирования критериев эффективности.

Для определения критериев эффективности способов действий сил ОО требуется решить три основные задачи. Первая состоит в уточнении самого понятия «критерий эффективности боевых действий», вторая – в выборе способа оценивания, третья – в определении способа решения задачи многокритериального выбора лучшего варианта способа действий.

Сущность первой задачи заключается в несоответствии используемого в теории эффективности боевых действий определения критерия эффективности общесистемной методологии. В настоящее время критерий эффективности определяется как показатель, наиболее важный для данной задачи [2].

С точки зрения системного подхода [3], критерий эффективности – это не число, а условие (правило), при котором принимается решение при оценивании эффективности функционирования системы. Данная трактовка в большей мере соответствует смыслу задач оценивания эффективности функционирования боевой системы ОО и ее подсистем. Таким образом, критерий эффективности системы ОО целесообразно определить как условие, при котором оценивается соответствие функционирования боевой системы поставленной перед ней цели.

В этой связи в процессе исследования эффективности боевых действий сил и средств ОО космодрома предлагается использовать формализованный критерий оптимальности.

Формализованный критерий оптимальности – это условие выбора наиболее предпочтительного варианта, в котором некоторый показатель качества или эффективности P достигает экстремального значения P^* :

$$\langle \{X\}, \Phi_p \rangle \rightarrow l^*, \quad (3)$$

$$\Phi_p : P^* = \text{extr}_{l \in \{l_1, \dots, l_n\}} P(l), \quad (4)$$

которое трактуется следующим образом: выбор наилучшего, наиболее предпочтительного варианта (альтернативы) l^* из множества возможных вариантов $\{l\} = \{l_1, \dots, l_n\}$ осуществляется по формализованному критериальному правилу Φ_p ; наилучшему варианту l^* соответствует экстремум P^* (по смыслу задачи максимальное или минимальное значение) показателя качества или эффективности P .

Показатель качества или эффективности P может связываться:

- с расчетным (по вариантам) ущербом для своих сил («выбор по критерию минимальных потерь своих сил»), при этом подразумевается выполнение поставленной задачи (достижение цели действий);
- с расчетным (по вариантам) ущербом противнику («выбор по критерию нанесения противнику максимального поражения»);
- с расчетными (по вариантам) затратами ресурсов или времени («выбор по критерию минимальных затрат ресурсов или времени»);
- с расчетным (по вариантам) риском выполнения (невыполнения) задачи («выбор по критерию максимальной вероятности выполнения задачи»).

Отметим следующие обстоятельства, важные для понимания проблемы выбора в рассматриваемой постановке.

1. Критерий оптимальности (в отличие от критерия эффективности, характеризуемого выражением типа «вероятность сохранения объекта не ниже 0,8») не может выражаться числом: это всего лишь правило выбора наилучшего варианта по количественному показателю (шкале) качества или эффективности. Принимается вариант, для которого показатель принимает экстремальное значение, при этом собственно достигаемый уровень показателя формально не имеет значения.

2. Варианты действий – различные способы действий (по образу действий, времени, пространству, затратам), формируемые исследователем (ЛПР), а количественный показатель (шкала) качества или эффективности – средство формального представления качества этих вариантов.

3. Критерий оптимальности в практике обычно принимается скалярным. В исследовании операций принято выбирать вариант по скалярному критерию, который один отвечает за качество выбора. Возможна многокритериальная (векторная) постановка задачи принятия решения, например, задачи выбора по критерию максимального ущерба противнику и одновременно минимальных потерь своих сил. Такая постановка приводит к отысканию компромиссного варианта из числа вариантов, эффективных «по Парето». Но обычно она преобразуется к скалярной задаче оптимизации по одному из критериев с ограничениями на остальные, например, к задаче принятия решения по критерию максимального ущерба противнику с некоторым ограничением на потери своих сил и (или) сохранение охраняемого объекта.

4. Критерий оптимальности может выражаться в любой мере, по любому показателю, отражающему, в понимании исследователя (ЛПР), достижение цели. В этом смысле говорят, что показатель качества или эффективности должен соответствовать цели действий. Неудачный выбор показателя качества или эффективности приводит к неадекватности цели действий.

В соответствии с требованиями теории исследования операций критерий оптимальности выражается в вероятностной мере, в форме экстремума вероятностного показателя эффективности некоторых действий или вероятностного показателя риска в выполнении задачи [4].

Это – вероятности (выполнения главной и частных задач) или математические ожидания (нанесенного и предотвращенного ущерба).

Вероятностные показатели, также как и показатели, например, материальных и временных затрат, отражают процессы, связанные с проявлением результатов статистико-вероятностной природы (например, наблюдение, целеуказание, поиск, обеспечение (по видам) и т. п.) [4].

Для оценивания эффективности способов действий сил и средств КО объектов космодрома предлагается использовать две методики [5]:

- методика оценки исходного количественно-качественного соотношения сил сторон;
- методика прогноза изменения соотношения численностей сил (войск) противоборствующих сторон в процессе их столкновения.

Первая методика полностью отвечает требованию адекватности. Под «адекватным вероятностным прогнозом» понимается вероятностный прогноз, в котором отсутствует влияние военного искусства руководства сил сторон.

Вторая отвечает требованию адекватности только на этапе оценки обстановки. Разрешение вопроса освобождения данной методики от воздействия субъективных факторов заключается в том, чтобы методика отражала значение только состава сил и их потенциалов; закономерностей процесса боевого столкновения сил, сопоставляющих ущерб с материальными характеристиками сил своих и противника [5].

Указанные объективные закономерности имеют форму линейного или квадратичного закона боевых действий.

Линейный закон имеет место для сил, которые выполняют задачу напрямую в контакте с противником в форме дуэлей групп и тактических единиц противоборствующих сторон без возможности переноса и сосредоточения поражающего воздействия, т. е. в формах атак и тактических боев (состоящих из атак) [5].

Методически правильному учету закономерностей и минимизации исходных данных для сил, находящихся в непосредственном контакте с противником в форме дуэлей групп и тактических единиц сторон, соответствуют уравнения Ланчестера [1] для линейного закона боевых действий.

Квадратичный закон справедлив в случае противоборства сторон в форме оперативных ударов и боев, с применением средств поражения большой дальности. В данном случае группы и тактические единицы вне зависимости от своего места в построении сил могут сосредоточивать и переносить огонь по элементам группировки противника [5]. Схематично это представлено на рис. 3.

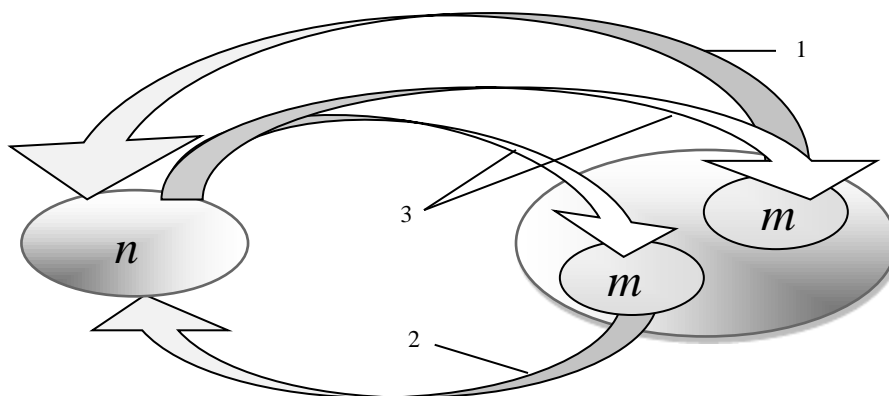


Рис. 3. Модель боевого взаимодействия сторон

Учету закономерностей боевых действий в форме ударов и боев с применением средств поражения большой дальности соответствуют уравнения Ланчестера [1] для квадратичного закона боевых действий.

При оценке ущерба или изменения соотношения сил сторон для группировки, включающей в себя силы, находящиеся в непосредственном контакте с противником, и силы, выполняющие задачи в форме ударов и боев с применением средств поражения большой дальности, суммарные оценки получаются путем применения методов обобщения частных оценок:

- либо тактических групп и единиц;
- либо боевых действий группировки сил и средств, состоящей из боевых действий тактических групп и единиц [5].

Для предложенных методик справедлива общая схема математического моделирования противоборства двух сторон A и B , представленная на рис. 4.

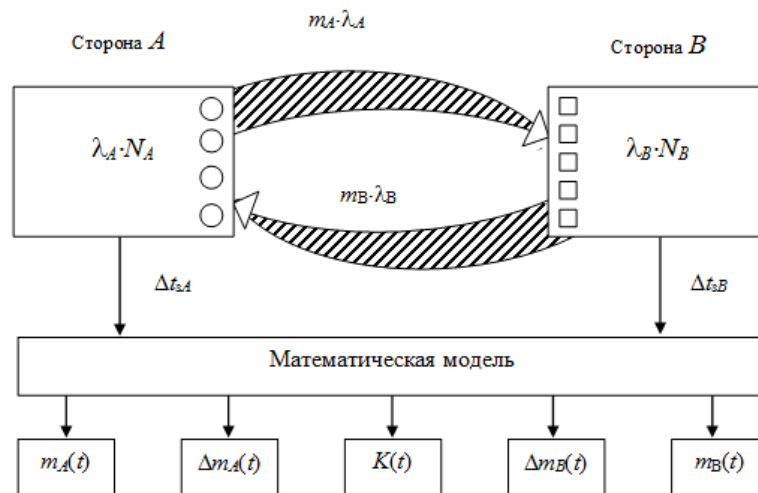


Рис. 4. Общая схема моделирования противоборства двух сторон

На рисунке приняты следующие обозначения:

N_A, N_B – начальные численности боевых единиц сторон A и B соответственно;

λ_A, λ_B – поражающие (эффективные) скорострельности боевых средств сторон, которые определяются из выражений: $\lambda_A = \alpha_A \cdot P_A$; $\lambda_B = \alpha_B \cdot P_B$, где α_A, α_B – параметры, характеризующие тактико-техническую скорострельность оружия сторон, P_A – вероятности поражения боевой единицы противника (стороны B) при производстве выстрела боевой единицей стороны A , а P_B – вероятности поражения боевой единицы противника (стороны A) при производстве выстрела боевой единицей стороны B ;

$m_A(t), m_B(t)$ – средние сохранившиеся численности боевых единиц на текущий момент времени t ;

$\Delta m_A(t), \Delta m_B(t)$ – средние потери боевых единиц на момент времени t ;

$K(t)$ – коэффициент количественно-качественного соотношения сил;

$\Delta t_{zA}, \Delta t_{zB}$ – время запаздывания в открытии огня стороной A или B ;

$m_A \lambda_A, m_B \lambda_B$ – поток поражающих выстрелов сохранившимся количеством боевых единиц сторон.

В качестве противоборствующих сторон выступают:

- сторона A – боевая система;
- сторона B – боевая система.

Каждая из сторон стремится нанести поражение противоположной стороне.

Для оценивания эффективности действий боевых систем используются математические методы, описывающие боевое противоборство двух сторон. Они позволяют провести оценку качественного и количественного соотношения сил сторон противоборствующих группировок войск. На основании [1] в качестве базового (основного) показателя для расчета ожидае-

мых результатов боевых действий используется количественно-качественное соотношение сил и средств сторон (K). Он представлен в виде следующего выражения:

$$K = \frac{N_A}{N_B} \sqrt{\frac{\lambda_A}{\lambda_B}}. \quad (5)$$

Показатель K определяет соотношение боевых возможностей сторон с учетом количественного состава N_A и N_B , качественных показателей их боевых средств λ_A и λ_B , выраженных через эффективную скорострельность этих боевых средств сторон (их производительность). При оценке боевых возможностей сторон возможны следующие случаи:

- если $K > 1$, то группировка боевых средств стороны A изначально превосходит по своим возможностям группировку боевых средств стороны B ;
- если $K < 1$, то группировка средств стороны B по своим боевым возможностям превосходит сторону A ;
- если окажется, что $K = 1$, то из этого следует вывод: противники по своим боевым возможностям равноценны.

В соответствии с квадратичным законом противоборства и на основании K определяются ненормированные частные показатели: Δm – средние потери боевых единиц на момент времени t сил и средств ОО; Δn – средние потери боевых единиц на момент времени t сил и средств НВФ и ДРФ противника; r_o , $r_{п}$, $r_{кр}$ – рубежи обнаружения, поражения и рубеж критического удаления противника от КВО; Γ_n – глубина проникновения НВФ и ДРФ противника; t_3 – время выполнения задачи НВФ и ДРФ противника; t_m – время маневра сил и средств ОО.

В соответствии с проблематикой уникального выбора или формирования способов действий подсистем ОО космодрома в борьбе с НВФ и ДРФ противника, определены нормированные частные показатели, позволяющие перейти от совокупности разнородных частных показателей к единому уровню отсчета для различных способов действий, что обеспечивает простоту и наглядность их сравнения:

– исходя из того, что в своих действиях НВФ и ДРФ противника, как правило, стремятся к скрытным действиям, обеспечивающим внезапное нападение на объект [1], то в этих условиях задача своевременного обнаружения их выходит на первый план, а **вероятность обнаружения НВФ и ДРФ противника (P_o)** определяется как первый нормированный частный показатель оценки эффективности ОО объектов космодрома [7–9];

– в свою очередь, учитывая тот факт, что при обнаружении НВФ и ДРФ противника последние будут стремиться не вступать в открытое противоборство, а быстро выходить из района расположения КВО космодрома, для того, чтобы в последующем повторить попытку его уничтожения [6], лишь поражение обнаруженных ДРФ и НВФ противника позволит, с высокой долей вероятности, предотвратить уничтожение КВО космодрома. Таким образом, **вероятность поражения НВФ и ДРФ противника (P_n)** определяется как второй нормированный частный показатель оценки эффективности ОО объектов космодрома.

Вероятности обнаружения и поражения противника позволяют перейти к оцениванию целевой функции ОО объектов космодрома. Основной целью, к которой стремится функционал ОО, является обеспечение выполнения космодромом задач по восполнению и наращиванию орбитальной группировки космических аппаратов в любых условиях обстановки и поддержание живучести его объектов путем исключения вывода их из строя в результате воздействия противника. Таким образом, показатель оценки эффективности ОО объектов космодрома должен соответствовать данной цели. Учитывая данное требование, в исследовании в качестве основного показателя оценки эффективности ОО выбрана **вероятность сохранения КВО космодрома ($P_{сох}$)**.

Рассматривая возможные (в исследовательской постановке) формулировки задач боевой системы ОО космодрома (нанесение требуемого ущерба противнику при сохранении уста-

новленной доли своих сил и средств с израсходованием при этом установленного количества ресурсов и сохранении КВО космодрома), можно сделать вывод, что наиболее предпочтительным способом является оптимизация (максимизация или минимизация) основного показателя оценки эффективности ОО объектов космодрома ($P_{\text{сох}}$) и установление ограничений на значения частных показателей оценки эффективности ОО (P_o и P_n).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Научная задача проводимого исследования, являясь сложной и многофакторной, предполагает выработку научно-методического подхода к определению показателей качества прогнозной оценки параметров ОО КВО космодрома, выбора представительных показателей, характеризующих эффективность обороны объекта космодрома и установление функциональной связи между ними.

Таким образом, при определении критерия оценивания эффективности способов действий сил и средств ОО объектов космодрома было учтено, что критерий – это условие, при котором оценивается соответствие функционирования боевой системы поставленной перед ней цели. Оценивать это соответствие предлагается в зависимости от задач поддержания требуемого уровня функционирования КВО космодрома и условий обстановки. Оценивание предлагается осуществлять исходя из степени реализации возможностей боевых подсистем ОО космодрома, для чего использовать нормированные показатели, а при использовании нескольких показателей предлагается оптимизировать величину основного, устанавливая ограничения на значения других.

Список используемых источников

1. Методика оценки боевых возможностей общевойсковых группировок и математическое обоснование принимаемых решений / В. Н. Кончиц [и др.]. – М.: ОА ВС РФ, 1990. – 178 с.
2. *Захаров И. Г.* Обоснование выбора. Теория практики. – СПб.: Судостроение, 2006. – 528 с.
3. *Садовский В. Н.* Основания общей теории систем: логико-методологический анализ. – М.: Наука, 1974. – 279 с.
4. *Поленин В. И., Комаров М. П.* Теория и практика управления силами (войсками): взаимосвязь целей, задач и критериев // Национальная безопасность и стратегическое планирование. – СПб.: ВУНЦ ВМФ «ВМА», 2017. – № 3. – С. 41–46.
5. *Поленин, В. И., Комаров М. П., Мешков О. К.* О порядке определения задач, способов и критериев их выполнения, соответствующем адекватному вероятностному прогнозу // Вестник академии военных наук. – 2006. – № 3. – С. 30–39.
6. *Дорохов В. Л.* Методология оценки эффективности боевых действий общевойсковых формирований тактического звена // Оборонная техника. – 2009. – № 1. – С. 44–50.
7. Вопросы прогностики. Теория и методы прогнозирования военного потенциала зарубежных стран: научно-метод. материалы. – М.: ЦИВТИ МО РФ, 2007. – 360 с.
8. *Дорохов В. Л.* О категориях в военно-научном познании // Вестник войсковой ПВО. – Смоленск: ВА ВПВО ВС РФ, 2009. – Вып. № 1. – С. 67–73.
9. *Дорохов В. Л.* Требования к асимметричным способам боевых действий общевойсковых соединений // Основные результаты диссертационных исследований докторантов, адъюнктов и соискателей академии: научный сборник. – М.: ВУНЦ СВ «ОВА ВС РФ», 2015. – № 64. – С. 88–98.

Krasnov S. A., Lokhvitskiy V. A., Khabarov R. S. Numerical analysis of multichannel queuing systems with absolute priority based on the phase approximation of the continuous busy period // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 682. – P. 7–20.

An approach is proposed for calculating the time characteristics of multichannel queuing systems with absolute priority and additional servicing of an interrupted claim based on approximating the period of continuous employment by phase-type distributions. This approach is a generalization of the well-known method of successive dimensionality reduction (SDR) for the case of arbitrary values of the coefficients of variation of the service time. The substantiation of the choice of the variant of phase distributions for the approximation of the service time and periods of continuous employment is given. The results of calculations are presented in comparison with the data of simulation and the method of invariants of the ratio depending on the number of channels, the load factor and the coefficient of variation of the service time.

Key words: $M / G / n$, $M / Ph / n$, multichannel queuing systems, priority service, periods of continuous employment, absolute priority.

Avksentyev A. A. Connecting two lines of vision shortest line method for cosmic object coordinates calculation // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 682. – P. 21–28.

The method for cosmic object coordinates calculation for uncrossing lines of vision is created. The sequence of actions for reducing measurement results to fixed time is determined. Formulas for calculation of the shortest line middle place coordinates between used lines of vision are received. Cosmic object position mistakes are determined taking into account the corner between lines of vision, distances up to object and measuring equipment accuracy.

Key words: spacecraft, cosmic object coordinates, line of vision, mistakes of measurements.

Algorithm for forming an analytical group time scale based on the Kalman filter with adaptive recurrent selection of weight factors for the current state vector / K. V. Bakurskii, A. A. Makarov, T. O. Myslivtsev, S. V. Nikiforov // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 682. – P. 29–37.

To improve the accuracy of coordinate-time and navigation support, constant improvement of the unified time system (CTS) of the Russian Ministry of Defense is required, which includes time and frequency standards, as well as channels for transmitting accurate time signals. The CTS includes the State Standard of Time and Frequency (Rosstandart), which implements the national coordinated time scale UTC (SU) and a central synchronizer, the time of which is transmitted by the orbital segment of the GLONASS system.

The development of CTS requires the creation of new ground time and frequency standards with a relative daily instability of 10-16 or more, as well as the restoration of a national time storage system in the form of a network of primary and secondary standards, as well as mobile carrier standards.

The network distribution of standards, first of all, should provide for the presence of channels for their mutual synchronization, reverse information links, centers for collecting and processing data on the parameters and accuracy characteristics of groups of standards distributed according to a global and territorial basis.

The construction of a spatially distributed system of standards makes it possible, in data collection and processing centers, to create software-algorithmic complexes for the formation of analytical group time scales, built according to the hierarchical principle of equal-precision standards.

The paper proposes a variant of the recurrent algorithm for the formation of the time scales of a group of rubidic frequency standards based on the adaptive Kalman filter. When implementing the filter, we used the method of weight summation of polynomial functions with a short term accumulation of filtered data in a group.

Key words: analytical group time scale, recurrent computational procedures.

Voznyuk V. V., Kopalov Y. N., Fomin A. V. A method for increasing the noise immunity of phase-manipulated signals receivers with spectrum expansion a pseudo-random sequence based on the use of an interference compensator filter // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 682. – P. 38–47.

A method of increasing the noise immunity of signal receivers with spectrum expansion by direct modulation of the carrier pseudorandom sequence (PSP) based on the use of an interference compensator filter is considered. The proposed method is based on the isolation of the interference component from a mixture of signal and interference, followed by its compensation at the receiver input. The evaluation of the effectiveness of the method under consideration for various parameters of active signals and interference has been carried out. The main parameters under study include: the values of the average power and the base of the signal (the length of the PSP); dispersion, spectrum width and type of interference. At the same time, as an indicator of the effectiveness of the compensator filter, the ratio of the values of the interference dispersion at the input of the receiver resolver without using the compensator filter to the interference dispersion at the input of the receiver resolver when using the specified device is selected.

Key words: interference compensator filter, noise immunity, spectrum expansion, pseudorandom sequence.

Gorbulin V. I., Polyakov S. A., Skoptsov A. A. Taking into account the critical stages of the satellite traveling the shadow segments of the orbit when justification of the orbital construction of high orbital systems using dissymmetric polystructures // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 682. – P. 48–59.

In contrast to low orbits, which are characterized by a fairly uniform alternation of illuminated and shadow parts of the orbit, medium and high orbits are distinguished by the presence of a set of shadowless stages of spacecraft flight lasting up to several months, which are replaced by critical ones with numerous sufficiently long time intervals for the passage of the Earth's shadow. The periodicity and duration of critical stages of the satellite's passage through numerous shadow sections of the orbit is investigated. The features of the class of dissymmetric ballistic structures are considered, the possibilities of taking into account the critical stages at the stage of substantiating the appearance of promising high-orbit space systems based on dissymmetric polystructures are discussed.

Key words: orbital constellation, high-orbit segment, ballistic polystructure, class of dissymmetric ballistic structures, wireless energy transmission.

Erokhin V. I., Kadochnikov A. P., Kakaev V. V. Method for determining the parameters of the orbit of space objects by measurements at small time intervals // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 682. – P. 60–69.

The article proposes a method for determining the parameters of the motion of space objects based on the combination of coordinate information independently obtained by several information means at non-regular time intervals small in relation to the period of the space object's rotation, which, unlike known methods programmatically implemented in information tools in the form of real-time algorithms, allows more accurately determining the parameters of the Keplerian model of

motion in the conditions of errors of single measurements. The presented analytical calculations and the results of computational experiments with model data.

Key words: Keplerian model of motion, determination of orbit parameters, observations at small time intervals.

Kovalenko E. L., Fadin I. A. Modification of space triangulation method // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 682. – P. 70–76.

Automated system of near-earth space dangerous situations warning is for prevention of dangerous situations in near-earth space. Actual domestic automated system of near-earth space dangerous situations warning includes only ground-based facilities located on Russian or Near Abroad territory. This fact does not allow operative detecting of space situation changes. Space awareness system orbital segment creation will allow improving the operativeness of solution of task of space objects movement parameters determination. The article contains description of main methods of space objects movement parameters determination and reasoning of modification of space triangulation method for space awareness system orbital segment creation.

Key words: space awareness, orbital system, space triangulation method.

Novikov E. A., Sevostyanov A. S., Stepanova E. A. Multiservice traffic service model with a complex structure in the satellite communication network in the conditions of conflict interaction of complex radio engineering systems // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 682. – P. 77–87.

A method of analytical of a queuing system based on hyperdeltate approximation of arbitrary distribution densities is presented. A simulation model of queuing system has been developed with the intensity of traffic receipt distributed according to the Pareto law and the intensity of packet service distributed according to the gamma law.

Key words: queuing system, hyperdelt approximation, gamma distribution, Pareto distribution.

Topchy P. N. Synchronization in digital radio receiving systems using noise-like phase-manipulated signals // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 682. – P. 88–96.

The development of computing facilities has led to the widespread use of digital signal processing for filtering and processing received information. The use of signals with direct spectrum expansion in digital receivers in information transmission systems requires a synchronization in frequency and phase of the oscillation of the carrier signal, and also searching and tracking for structure of a pseudorandom sequence. When we analyze the signal, it is necessary to consider the possibility of working the receiver operating with a given quality at a signal-to-noise, which is less than one. The article is devoted to the development of a mathematical instrument that allows to search and track the frequency and phase of oscillation of a carrier signal with an extended spectrum without affecting the master generator of software-defined radio systems with using digital methods.

Key words: Software Defined Radio (SDR), Universal Software Radio Peripheral (USRP), frequency and phase search and synchronization.

Alekseev V. F., Andrievskaya V. Y., Danilova T. N. On the accuracy of determining anomalies of heights by modern models of the Earth's gravitational field // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 682. – P. 97–102.

The article presents the results of studies to control the accuracy of anomalies of heights, calculated using digital models of the Earth's gravitational field on a reference polygon created by the method of satellite leveling. The results of comparing height anomalies calculated at points of

the same name using various models are presented. The necessity of deriving domestic models of the Earth's gravitational field with the order and degree of harmonic coefficients not less than 2000 is substantiated.

Key words: gravity potential, disturbing geopotential, Earth's gravitational field, quasigeoid, altitude anomaly, spherical harmonics, leveling, digital model, root mean square discrepancy.

Astapovich A. V., Kolesnikov D. D., Medyanikov D. O. Methodology of justification of technical requirements for measurements when creating special geodetic networks // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 682. – P. 103–110.

The article presents a solution to the problem of substantiating the required accuracy of angular and linear measurements, as well as the number of measurement techniques and tolerances when creating special geodetic networks. It is shown that the substantiation of the number of receptions should be based on dividing measurement errors into random and residual systematic errors. In this case, the planning of measurements must be carried out under the condition that the influence of random errors on the accuracy of the results obtained is neglected. The necessary evidence and formulas for calculating the number of receptions for a given accuracy of the elements of geodetic construction and technical characteristics of the measuring instrument are given. The necessary calculations are given for the assignment of tolerances for the range of variation of the results of multiple measurements and the discrepancy of geometric conditions in linear-angular constructions.

Key words: special geodetic network, measurement planning, multiple measurements, number of measurement receptions, arithmetic mean, random error, residual systematic error, measurement accuracy.

Zhbanov K. K. A model for obtaining normal heights of relief in an inaccessible territories based on the survey data of space complexes // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 682. – P. 111–119.

A model is proposed for obtaining normal height of relief for inaccessible territories using space-based remote sensing of the Earth, ground-based topogeodetic information and data on the anomaly of the Earth's gravitational field, approaches to obtaining, analyzing and processing initial geodetic data to inaccessible territories are formulated, the structural and functional blocks of the proposed model are described.

The above mentioned feature of the model is the joint use of geodetic data in the form of digital terrain models obtained remote sensing methods of various physical nature (optical stereomapping and radar interferometry).

Key words: remote sensing, digital terrain models, normal height, optical stereomapping, radar interferometry, least square method, joint processing heterogeneous remote sensing data.

Automated expert system of operational control of dangerous natural processes and phenomena / I. D. Kanarsky, N. A. Kozlova, O. A. Koroleva, A. S. Podchassky // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 682. – P. 120–129.

The increasing number and intensity of dangerous natural processes and phenomena, as well as the lack of a reliable predictive base, raise the question of the need for their operational monitoring and control in the interests of ensuring the security of the territory of the Russian Federation in geophysical terms.

The article considers the problem of development of modern means of control of dangerous natural processes and phenomena. The article offers a way of solution of the given problem by creation of an automated complex of monitoring of dangerous natural processes and phenomena, describes existing developments and formulates main directions of further researches on this topic.

Key words: automated expert system; dangerous natural processes and phenomena; operational monitoring; control; geophysical information; database; information processing; Shortleaf-Buchanan method.

Orientation transfer by means of unmanned aerial vehicles / N. A. Kozlov, D. O. Medyannikov, A. V. Prokofiev, D. V. Sergeev, A. A. Shchekolev // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 682. – P. 130–135.

The article suggests an approach to the orientation transfer by means of helicopter type unmanned aerial vehicles (quadcopters), electronic total stations and the theoretical foundations of indirect methods for determining the orientation angle. A scheme for the transmission of orientation between devices installed in the initial positional areas through the direction of the air line between two quadcopters, a measurement algorithm and calculation formulas with subsequent accuracy assessment are given in the article.

Key words: orientation transfer, orienting angle, unmanned aerial vehicle.

Lopukha V. O., Fedoseeva N. V. Satellite-derived comparative analysis of Barents and Kara polar mesocyclones for 2017–2021 // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 682. – P. 136–142.

The formation of polar mesocyclone is characterized by a sudden deterioration of the weather and dangerous weather phenomena, which makes their study one of the most urgent tasks in view of the active development of the Northern Sea Route. In the course of this work, based on daily multispectral satellite imagery using MODIS Aqua and MODIS Terra data, a comparative analysis of the interannual and intraannual variability of the temporal distribution of polar mesocyclone in the Barents and Kara Seas for 2017–2021 was performed and analyzed their storm tracks.

Key words: mesocyclones, Kara Sea, Barents Sea, Aqua, Terra.

Morozov E. B., Shershak A. N. Application of foreign cartographic space systems materials for the creation of state topographic maps and state topographic plans // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 682. – P. 143–149.

This article presents the study results of the usage of foreign space systems materials for the creation of state topographic maps and state topographic plans, as an addition to native space systems. The relation between the spatial resolution of satellite imagery and the scale of the cartographic product is calculated.

Key words: remote sensing, space cartographic systems, state topographic maps, state topographic plans.

Biryukov D. N., Zakharov O. O., Timashov P. V. Approach to reducing the information security risks associated with the application of macros in office documents // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 682. – P. 150–161.

The problem of spreading malicious software using macros in office documents is considered. Existing security policies and mechanisms for office suites are analyzed, an approach to building a security tool that takes into account the shortcomings in existing mechanisms is proposed, a prototype is implemented that confirms the applicability of the approach in real conditions, proposals are made for setting up Windows family operating systems to ensure safe operation with documents.

Key words: information protection, malicious software, computer attacks, information security.

Mathematical model of estimation of dynamic characteristics of depreciation systems of protected objects / A. V. Antropova, V. V. Kozlov, A. V. Lagun, K. A. Lyamin // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 682. – P. 162–170.

The main provisions of the mathematical model are presented, which makes it possible to perform estimated calculations of dynamic loads acting on protected objects of equipment during seismic impacts on them. The impulse effect on the protected objects is countered by the operation of hydraulic dampers and pneumatic shock absorbers. Overloads and displacements perceived by protected objects are taken as the main evaluation parameters in the calculations. The results of the calculations performed allow us to evaluate the technical parameters of depreciation systems and select their values that meet the specified restrictions on overloads and displacements for protected objects.

Key words: protected object, impact pulse, overload, displacement, movement dynamics, depreciation parameters.

Evaluation of lightning-simulating current generator characteristics / S. G. Burlutsky, A. S. Golosiy, A. P. Kovalev, R. V. Sakhabudinov // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 682. – P. 171–182.

Analytical dependencies of KT-160D (G) current impulse are shown. Circuit designs and complex devices of time-continuous impulse creation are offered. Basic technical parameters of current impulse generators and high voltage impulse capacitors are shown.

Key words: current impulse, current impulse generator, current pulse edge, edge gain time, electrical circuit, high voltage generator, capacitor.

Model of maintenance and repair of a spatially distributed object of operation / A. N. Dyakov, A. S. Kokarev, A. A. Levchuk, A. S. Orlov // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 682. – P. 183–192.

The article presents the formulation of the problem of modeling maintenance and repair of a distributed complex in order to study the effect on the readiness coefficient of the object of operation of the structure of spatial placement of its components and supply bases, which in the article is understood as the temporary location of repair personnel and standard replacement elements. Information is described – an operational model of the interaction of the elements of the complex and its maintenance and repair system in terms of ensuring the prompt arrival of repair personnel and standard replacement elements to the objects of operation, a description of the states of the model elements in the context of a system of difference equations is proposed. An algorithm for forming service plans according to the criterion of the minimum period of inactivity of the objects of operation is developed. The model is implemented in the form of a computer program (console at - the results of experimental development of the model are shown and the directions of its practical application are proposed.

Key words: difference equations, maintenance, discrete-time models, algorithmic description of changes in the state of the system, remote supply bases.

A model for maintaining the availability of multy-chanel devices with regulated maintenance / A. N. Dyakov, A. S. Kokarev, A. V. Pachin, D. V. Shapovalov // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 682. – P. 193–202.

The article discusses the system of maintenance and repair of a transmitting radio facility, on the functioning of which its effectiveness largely depends. A new method of evaluating the effectiveness of the system of maintenance and repair of a multichannel transmitting radio facility is proposed. A new model has been developed to support the readiness of multichannel complex

technical systems, which makes it possible to establish the dependence of readiness and the amount of operating costs on the design and layout scheme of the device, the reliability of elements, the frequency of regulations and the resource intensity of operational measures.

The application of the developed readiness maintenance model in combination with optimal selection methods will allow us to justify the inter-regulatory periods of devices as part of a transmitting radio engineering facility that provide the required readiness with minimal operating costs. The presented results of the approbation confirm the practical significance of the developed scientific and methodological apparatus.

Key words: maintenance and repair system; maintenance parameters justification, regulated maintenance; inter-regulatory period; transmitting radio engineering facility.

Kazakhov B. D., Kozlov V. V., Lagun A. V. Assessment of the possibility of adapting the missile system to external destructive influences // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 682. – P. 203–214.

In the course of a comprehensive assessment of the properties of complex technical systems, including ground-based missile systems, as a rule, the efficiency target indicator is used. At the same time, an important stage in the formation of methodological approaches for evaluating the properties of ground-based missile systems is the procedure for determining the list of indicators with which it is possible to characterize the formation of this complex with the required degree of detail in different conditions of the situation and at different time intervals. For this purpose, the conceptual provisions on the creation of a system for evaluating ground-based missile systems of a new generation, for which the adaptation property is introduced, are considered. To assess adaptation as a property, expressions for the adaptation indicator are proposed, which allows forming the directions of implementation of adaptation processes.

Key words: rocket and space complexes, structural element, resource allocation, life cycle, emergency situation, indicator, coordinating processes.

Klepov A. V., Stepenko A. N., Shapovalov D. V. Development of approaches to justification of costs for the supply of equipment during the creation or modernization of ground space infrastructure objects // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 682. – P. 215–225.

The results of the analysis of approaches to assessing the cost of newly created or purchased equipment used in space creation or modernization of objects of ground space infrastructure are presented. Taking into account the specifics of the tasks to be solved and the timing of the creation and modernization of existing complexes, the task of justifying the marginal costs for ordering and supplying equipment for the construction or reconstruction of a complex technical complex was formulated and solved on the basis of the criterion of compliance of the purchase cost of equipment with the estimated (calculated) values of this cost. Taking into account the actual initial data, calculations were carried out to determine the marginal purchase price of the compressor unit used in the system for supplying compressed gases to space rockets.

Key words: ground space infrastructure, equipment cost estimation methods, purchase cost.

Kryzhanovskiy V. I., Slatov S. V., Trofimov I. A. A closed-loop control algorithm for the optimal speed of the rotation of the remote sensing spacecraft of the Earth // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 682. – P. 226–237.

A closed-loop control algorithm has been developed to ensure the optimal speed of the rotation of the Earth remote sensing spacecraft in order to point the observation equipment at a single object located on the Earth's surface. At the end of the turn, the equality of angles and angular velocities of the line of sight of the observation equipment and the line of direction to the target should be en-

sured to prevent image shift. Numerical simulation results are presented, confirming the possibility of implementing the developed algorithm.

Key words: closed-loop control algorithm, optimal turn in terms of speed, spacecraft, targeting, remote sensing of the Earth.

Nikolaev A. Y., Samoilov E. B., Shmelev V. V. A model for detecting semantic errors in algorithms of primary processing of telemetry information of space vehicles // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 682. – P. 238–247.

The article provides a brief description of the stages of processing telemetric information of space vehicles, for which descriptions of semantic errors of processing algorithms are given. The formal systems used to describe the algorithms are considered and analyzed, the choice of the MP-automaton model is substantiated.

The task of identifying errors in algorithms for processing telemetry information is set, for which a model for detecting errors in algorithmization is synthesized, based on the use of an automaton-linguistic approach.

For algorithms for monitoring channel and frame synchronization, as well as rejecting invalid frames, practical examples of the operation of the proposed models based on the use of test segments of a group telemetry signal are given, and the correctness of error detection is shown.

Key words: telemetric information processing, automaton model, linguistic model, processing errors.

Altukhov A. I. Problems of development of didactic and ergonomic components of an electronic textbook on physics // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 682. – P. 248–256.

The article considers electronic educational publications as a set of interrelated didactic means through multimedia technology. The didactic and ergonomic possibilities of electronic educational publications are presented on the example of an electronic textbook on physics. Examples of the use of didactic tools to support the main (text) material of the textbook are given.

Key words: electronic educational publications, electronic textbook, didactic tools, multimedia technologies.

Guzenko V. L., Dorokhov V. L., Kurday N. V. The use of the concept of "Acceptable risk" in ensuring the safety of objects of the educational and material base of combat training in the daily activities of the troops // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 682. – P. 257–261.

The publication offers an approach to assessing the risks of combat training facilities, based on the analysis of the states of objects. Objects are affected by many factors of various nature, the manifestation of which leads to risks when making decisions. Taking into account risks by officials allows us to obtain reliable quantitative estimates of the risk of implementing management decisions.

Key words: educational and material base, security, combat training, risk, damage.

Devyatkin A. M., Rakov E. S., Terenin A. E. Adaptation of sir models to solve problems of training organization in higher educational institutions under conditions of new coronavirus infection spreading // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 682. – P. 262–271.

The article describes the way of taking into account in SIR models of mathematical theory of epidemic spreading the conditions of training and living of cadets in higher educational institution. The results of calculations according to the modified model are given. The task of organizing

training at a higher educational institution under conditions of coronavirus infection spreading is formulated for the solution of which the developed improved model can be used.

Key words: coronavirus, epidemic, SIR models, mathematical modeling, higher education institution, Green's function, beta distribution.

Kabalin V. L., Prischepa V. N., Severenko A. V. Problematic aspects of combat training management in the conditions of its intensification and approaches to their solution // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 682. – P. 272–278.

The article substantiates the conceptual apparatus adapted to the tasks of intensification of combat training. A variant of the approach to modeling the controlled process of military training is given. Recommendations are given on the planning of combat training activities and directions for further research in order to increase its effectiveness.

Key words: intensification of combat training, productivity, intensity, effectiveness and efficiency of training activities, efficiency of the educational process, intensity of training activities.

Solovyov A. V., Chrushch R. M. Improving the methodology of conducting intermediate certification // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 682. – P. 279–286.

The analysis of the traditional evaluation of the results of intermediate certification, which plays an important role in the control system of vocational training of students, is carried out. After that, it is proposed to use a cumulative points system to evaluate the results of the intermediate certification.

Key word: performance monitoring system, quality of training, current performance monitoring, boundary control, intermediate certification, cumulative points system.

Maltsev G. N. History of development of command-measurement systems and radio control technologies of spaceships from the flight of the first artificial earth satellites to the present day // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 682. – P. 287–293.

The history of the development of radio engineering controls for spaceships of the Ground-based automated control complex from the first command radio lines to modern command and measurement systems is presented. The stages of development of command and measurement systems and the features of their technical implementation at each stage are systematized. Modern and promising technologies for radio control of spaceships, including technologies for controlling small spacecraft of promising multi-satellite space systems, are considered.

Key words: spaceships control, command radio lines, command-measurement systems, spaceships radio control technologies.

Ogorodnikov V. P. System of determinations of scientific research // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 682. – P. 294–301.

The article deals with the main causes and non-causal determinants of the process of scientific search for truth. At the same time, the problem of the relationship between necessity and randomness in scientific research is analyzed, the connection between the goal and the result in finding the truth is demonstrated, the heuristic role of philosophical methodology in this process is revealed.

Key words: cause and effect, causal and non-causal determinants of the scientific process, necessity and randomness of scientific discovery, determinism, truth, phenomenon, essence, quantity, quality, measure.

Repyakh N. A., Hrustova A. N. World view paradigm N. A. Umova in russian cosmism // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 682. – P. 302–307.

The article discusses the cosmo-philosophical views of the outstanding Russian physicist N. A. Umov, the formulation and solution by scientists of the problems of the evolution of the Universe, life, man's place in the world, his freedom and cognitive capabilities, the emergence and exacerbation of global problems.

Key words: space, Universe, evolution, life, the principle of universal connection, harmony, knowledge, global problems.

Methodological approach to substantiation of indicators and criterion for evaluating the effectiveness of solving problems of protection and defense of the cosmodrome / N. A. Bashlyayev, V. L. Guzenko, V. L. Dorokhov, A. V. Fedorov // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2021. – Release 679. – P. 308–316.

The article proposes an approach to substantiating indicators and a criterion for evaluating the effectiveness of solving problems of protection and defense of the cosmodrome, carried out on the basis of the integrated use of forces and means of direct and territorial defense in the system of protection and defense of critically important objects of the cosmodrome, which characterize the realizable capabilities of the system as a whole and its subsystems in separately. Possible methods of evaluating the effectiveness of methods of action of forces and means of protection and defense of the cosmodrome objects are considered.

Key words: efficiency, performance indicators, performance criteria, assessment methodology, probability.

Авксентьев Александр Алексеевич, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-10-21.

Алексеев Виктор Фёдорович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 217-03-39, e-mail: vka@mil.ru

Алтухов Александр Иванович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел. 8 (812)347-95-08, e-mail: vka@mil.ru

Андриевская Виктория Юрьевна, кандидат физико-математических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (921) 635-46-61, e-mail: vka@mil.ru

Антропова Александра Владимировна, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (921) 593-53-25.

Астапович Анатолий Владимирович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (197198, Россия Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-76, e-mail: vka@mil.ru

Бакурский Клим Валерьевич, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-99-31, e-mail: vka@mil.ru

Башляев Николай Андреевич, 1-й Государственный испытательный космодром Министерства обороны Российской Федерации (164170, Россия, Архангельская область, Мирный, ул. Неделина, 29); e-mail: bash-nik2008@mail.ru

Бирюков Денис Николаевич, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-87, e-mail: vka@mil.ru

Бурлуцкий Сергей Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (19000, Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67); тел.: 8 (812) 494-70-12, e-mail: sergey_burluckiy@mail.ru

Вознюк Валерий Васильевич, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-35.

Голосий Александр Сергеевич, кандидат технических наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (19000, Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67); тел.: 8 (812) 494-70-12, e-mail: a.s.golosiy@mail.ru

Горбулин Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-89, e-mail: vka@mil.ru

Гузенко Виталий Леонидович, кандидат технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 969-87-83, e-mail: vka@mil.ru

Данилова Татьяна Николаевна, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (905) 204-35-78, e-mail: vka@mil.ru

Девяткин Александр Михайлович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 237-19-60, e-mail: vka@mil.ru

Дорохов Вячеслав Леонидович, доктор военных наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-29, e-mail: vka@mil.ru

Дьяков Алексей Николаевич, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-35, e-mail: vka@mil.ru

Ерохин Владимир Иванович, доктор физико-математических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (961) 712-89-82, e-mail: vka@mil.ru

Жбанов Константин Константинович, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (929) 115-47-71, e-mail: vka@mil.ru

Захаров Олег Олегович, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-87, e-mail: vka@mil.ru

Кабалин Владимир Львович, кандидат военных наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-93-08, e-mail: vka@mil.ru

Кадочников Андрей Павлович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (981) 897-43-25, e-mail: vka@mil.ru

Казахов Батраз Джумаевич, доктор военных наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (951) 664-50-26.

Какаев Виталий Викторович, доктор военных наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 196-89-83, e-mail: vka@mil.ru

Канарский Игорь Дмитриевич, кандидат географических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (921) 181-79-00, e-mail: vka@mil.ru

Клепов Андрей Владимирович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 240-32-56.

Ковалёв Александр Павлович, доктор технических наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (19000, Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67); тел.: 8 (812) 494-70-12, e-mail: kovalevAP1961@yandex.ru

Коваленко Елена Леонидовна, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 237-12-49, e-mail: vka@mil.ru

Козлов Владимир Владимирович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 215-00-23, e-mail: vka@mil.ru

Козлов Николай Аифалович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-76, e-mail: vka-onr@mil.ru

Козлова Наталья Александровна, кандидат географических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 998-40-45, e-mail: vka@mil.ru

Кокарев Алексей Сергеевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-35, e-mail: vka@mil.ru

Колесников Денис Дмитриевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-76, e-mail: vka-onr@mil.ru

Копалов Юрий Николаевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-35.

Королёва Ольга Александровна, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (952) 361-51-05, e-mail: vka@mil.ru

Краснов Сергей Александрович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 734-65-50, e-mail: vka@mil.ru

Крыжановский Владимир Иванович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Курдай Николай Владимирович, кандидат военных наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-29.

Лагун Андрей Валерьевич, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 937-09-02.

Левчук Анатолий Александрович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-35, e-mail: vka@mil.ru

Лопуха Владимир Олегович, Российский государственный гидрометеорологический университет (192007, Россия, Санкт-Петербург, ул. Воронежская, 79); тел.: 8 (981) 104-61-48, e-mail: volopukha@yandex.ru

Лохвицкий Владимир Александрович, доктор технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 700-96-63, e-mail: vka@mil.ru

Лямин Константин Александрович, Конструкторское бюро специального машиностроения (192012, Россия, Санкт-Петербург, пр. Обуховской Обороны, 120); тел.: 8 (911) 951-24-32, e-mail: konstantinkbsm@yandex.ru

Макаров Андрей Александрович, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-99-31, e-mail: vka@mil.ru

Мальцев Георгий Николаевич, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-32.

Медяников Даниил Олегович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-76, e-mail: vka@mil.ru

Морозов Егор Борисович, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (921) 655-59-16, e-mail: vka@mil.ru

Мысливцев Тимофей Олегович, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-99-31, e-mail: vka@mil.ru

Никифоров Сергей Валерьевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-99-31, e-mail: vka@mil.ru

Николаев Алексей Юрьевич, 1-й ГИК МО РФ (164173, Россия, Архангельская обл., г. Мирный, ул. Неделина, 17); тел.: 8 (960) 006-47-47, e-mail: aleksei_nikolaev@internet.ru

Новиков Евгений Александрович, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 218-51-19.

Огородников Владимир Петрович, доктор философских наук; профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (951) 668-24-86; e-mail: vka@mil.ru

Орлов Алексей Сергеевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-35.

Пачин Андрей Владимирович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-35, e-mail: Pachin_Andrey@bk.ru

Подчасский Антон Сергеевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Поляков Сергей Александрович, кандидат технических наук; Аппарат коллегии Военно-промышленной комиссии Российской Федерации (103274, Россия, Москва, Краснопресненская наб., 2); тел.: 8 (812) 347-95-89, e-mail: vka@mil.ru

Прищеп Владимир Николаевич, кандидат военных наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-29, e-mail: vka@mil.ru

Прокофьев Александр Валерьевич, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-76, e-mail: vka@mil.ru

Раков Евгений Сергеевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 237-19-60; e-mail: vka@mil.ru

Репях Николай Андреевич, кандидат философских наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 990-02-38, e-mail: vka@mil.ru

Самойлов Евгений Борисович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-65, e-mail: vka@mil.ru

Сахабудинов Роман Владиславович, кандидат технических наук, доцент; АО «Конструкторское бюро «Арсенал» имени М. В. Фрунзе» (195009, Россия, Санкт-Петербург, ул. Комсомола, 1-3); тел.: 8 (812) 542-29-73, e-mail: kbarsenal@kbarsenal.ru

Северенко Александр Викторович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-29, e-mail: vka@mil.ru

Севостьянов Андрей Сергеевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (906) 212-37-33.

Сергеев Дмитрий Викторович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-76, e-mail: vka@mil.ru

Скопцов Алексей Андреевич, ФГБУ 27 ЦНИИ МО РФ (125284, Россия, Москва, проезд 1-й Хорошёвский, 5); тел.: 8 (812) 347-95-89, e-mail: vka@mil.ru

Слатов Сергей Валерьевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 767-55-31.

Соловьев Алексей Владимирович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-76, e-mail: vka@mil.ru

Степанова Елена Александровна, 16-й Центральный научно-исследовательский испытательный институт Министерства Обороны Российской Федерации имени маршала войск связи А. И. Белова (141006, Россия, г. Мытищи Московской обл., 1-й Рупасовский пер., 19); тел.: 8 (916) 710-94-88.

Степенко Андрей Николаевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

Теренин Андрей Евгеньевич, кандидат психологических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 237-19-60, e-mail: vka@mil.ru

Тимашов Павел Васильевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-87, e-mail: vka@mil.ru

Топчий Павел Николаевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-86-32, e-mail: vka@mil.ru

Трофимов Илья Анатольевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 163-12-99.

Фадин Илья Алексеевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 237-12-49, e-mail: vka@mil.ru

Федоров Андрей Вадимович, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-29, e-mail: vka@mil.ru

Федосеева Наталья Владимировна, кандидат географических наук; Российский государственный гидрометеорологический университет (192007, Россия, Санкт-Петербург, ул. Воронежская, 79); тел.: 8 (921) 771-20-33, e-mail: fednat@mail.ru

Фомин Алексей Викторович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-35.

Хабаров Роман Сергеевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 834-54-56, e-mail: vka@mil.ru

Хрустова Алена Николаевна, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (905) 225-88-87, e-mail: vka@mil.ru

Хрущ Роман Михайлович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-76, e-mail: vka@mil.ru

Шаповалов Дмитрий Викторович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-35.

Шершак Андрей Николаевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 950-18-84, e-mail: vka@mil.ru

Шмелёв Валентин Валерьевич, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-65, e-mail: vka@mil.ru

Щеколев Алексей Александрович, Топогеодезическая служба Главного штаба Воздушно-космических сил Российской Федерации (119019, Россия, Москва, ул. Знаменка, 14).

Аверкиев Николай Фёдорович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-16, e-mail: averkiev@mail.ru

Алексеев Виктор Фёдорович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 217-03-39.

Алексеев Тимофей Владимирович, доктор исторических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8(812) 347-95-04.

Алёшкин Андрей Петрович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-31.

Астапович Анатолий Владимирович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-42, e-mail: vka@mil.ru

Басыров Александр Геннадьевич, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 248-57-80, e-mail: alexanderbas@mail.ru

Гончаренко Владимир Анатольевич, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 242-01-19, e-mail: vlango@mail.ru

Доронин Александр Павлович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 943-66-40, e-mail: vka.spb.ru

Калинин Владимир Николаевич, заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации, доктор технических наук, профессор, действительный член Российской академии космонавтики имени К. Э. Циолковского и Санкт-Петербургской инженерной академии, член-корреспондент Международной инженерной академии, Российской инженерной академии, Международной академии информатизации; Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-08, e-mail: kvn.112@mail.ru

Каргу Дмитрий Леонидович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-22, e-mail: vka@mil.ru

Косырев Сергей Викторович, доктор военных наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-93.

Косяков Евгений Николаевич, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 235-30-63, e-mail: e-kosyakov@yandex.ru

Кужекин Николай Сергеевич, кандидат философских наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 794-16-72, e-mail: kns656@mail.ru

Кунтурова Надежда Борисовна, доктор педагогических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-31, e-mail: giz26@rambler.ru

Лебедев Евгений Леонидович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8(812) 347-95-11, e-mail: vka@mil.ru

Лоскутов Андрей Иванович, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (904) 551-24-91, e-mail: rujenx@mail.ru

Назаров Андрей Вячеславович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 347-95-33.

Новиков Владимир Александрович, доктор военных наук, профессор, действительный член Академии военных наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 200-44-95, e-mail: vka@mil.ru

Новиков Евгений Александрович, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 218-51-19, e-mail: vka@mil.ru

Огородников Владимир Петрович, доктор философских наук; профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (951) 668-24-86; e-mail: ogo-vladimir@yandex.ru

Панкратов Алексей Владимирович, доктор технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-36, e-mail: pankratov-av@rambler.ru

Половников Виталий Иванович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (981) 934-97-72, e-mail: vka@mil.ru

Репях Николай Андреевич, кандидат философских наук, доцент; Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 990-02-38, e-mail: utkinodacha@yandex.ru

Решетников Дмитрий Владимирович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-11, e-mail: david_lxii@mail.ru.

Тарасов Анатолий Геннадьевич, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 251-42-53, e-mail: Atol-77@mail.ru

Фоминов Иван Вячеславович, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-21.

Хомоненко Анатолий Дмитриевич, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Щукин Георгий Георгиевич, доктор физико-математических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-52, e-mail: ggshchukin@mail.ru

Якимов Виктор Леонидович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-99-34, e-mail: yakim78@yandex.ru

Яковлев Алексей Иванович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-42, e-mail: vka@mil.ru